REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Systèmes

Analyse et optimisation d'un système d'énergie renouvelable appliqué au site isolé

Présenté par :

MOHAMMEDI Hassiba

DAHMANI Fatma Zohra

Proposé et Dirigé par :

Dr. YAHIAOUI Adel

Promotion 2024

Remerciements

Nous remercions le bon DIEU de nous avoir donné de la patience et de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à notre encadrant **Dr. YAHIAOUI Adel,** nous le remercions pour son aide, sa patience, sa générosité, sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire, le temps qu'il nous a accordé, et pour toutes les informations, réflexions, corrections etc.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent également à tous nos professeurs, pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont prodigué au cours des années passées au sein de l'Université, pour leur patience dont ils ont fait preuve.

Nous remercions ainsi tous nos proches, nos parents, nos familles, nos amis qui nous ont accompagné, soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce travail**.**

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents, source de vie, d'amour et de motivations, qui m'ont toujours soutenue et encouragée durant mes années d'études, auxquels je souhaite une longue vie.

Mon cher mari qui à toujours été à mes cotés et m'a encouragée dans mes moments les plus joyeux et les plus délicats

Mon cher fils 'Mohammed Firas', mon trésor.

Ma Famille MOHAMEDI et ma belle famille IKHLEF CHAOUCH, sources de bonheur et d'espoir.

Toutes mes amies à qui je souhaite beaucoup de succès.

Toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

Hassiba

Dédicaces

J’ai l’honneur de dédier ce modeste travail à la famille DAHMANI et BOUAHMED.

A celle qui a inséré le goût de la vie et qui m’a entouré d’amour, D’affectation et qui fait tout pour ma réussite ….

Merci ma Mère FARIDA

A celui qui a été toujours la source de courage et qui m’a aidé à devenir

Ce que je suis aujourd’hui……

Merci mon père feu NOURELDIN

À ma grand-mère, ceci est ma plus profonde gratitude pour votre amour éternel,

J’espère que ce rapport est le meilleur cadeau que je puisse vous offrir.

À mon oncle YOUSSEF qui est toujours à mes cotés et pour son encouragements, MERCI.

À mes frères : WAIL, MOHAMED ET FARES ET RAHIM…..

À Mes Proches amies BOUCHRA, RANIA, YASMINE ET MARWA, CHAIMA ET RAYAN, MARIA.

Fatma Zohra

ملخص

تتناول هذه الدراسة تحليل أداء نظام هجين لتحويل الطاقة الكهروضوئية باستخدام موارد متجددة. تقدم الدراسة نهجًا لتحسين مثالي لنظام يجمع بين الألواح الشمسية، وتوربينات الرياح، وبطاريات التخزين، والأحمال الكهربائية. يدمج هذا المشروع النهائي للدراسات العليا طريقة احتمالية فقدان إمدادات الطاقة (LPSP) لتزويد موقع في جنوب الجزائر بالكهرباء. تُجرى دراسة تقنية-اقتصادية لتقييم فعالية الطريقة المقترحة.

الكلمات المفتاحية : نظام هجين، تحسين مثالي ، إمدادات الطاقة (LPSP).

Résumé

Cette étude aborde l'analyse des performances d'un système hybride de conversion d'énergie photovoltaïque en utilisant des ressources renouvelables. Il présente une approche pour l'optimisation d'un système combinant des panneaux solaires, des éoliennes, des batteries de stockage et des charges électriques. Ce projet de fin d'études intègre la méthode de probabilité de perte d'énergie (LPSP) pour l'électrification d'un site dans le sud de l'Algérie. Une étude techno-économique est réalisée pour évaluer l'efficacité de la méthode proposée.

Mots clés : Système Hybride, optimisation, LPSP.

Abstract

This study addresses the performance analysis of a hybrid photovoltaic energy conversion system using renewable resources. It presents an approach for the optimization of a system that combines solar panels, wind turbines, storage batteries, and electrical loads. This final year project incorporates the Loss of Power Supply Probability (LPSP) method for the electrification of a site in southern Algeria. A techno-economic study is conducted to assess the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Hybrid System, optimization, LPSP

Table des matières

Liste des figures I
Liste des tableaux IV
Liste des abréviations V
Introduction générale 1

Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables

1.1 Introduction 4
1.2 Le rayonnement solaire 5
1.2.1 Le soleil 5
1.2.1.1 Caractéristiques du soleil 5
1.2.2 Le spectre solaire 5
1.2.3 Le rayonnement solaire extraterrestre 6
1.2.4 Les composantes du rayonnement solaire 6
1.2.4.1 Le rayonnement direct 6
1.2.4.2 Le rayonnement diffus 7
1.2.4.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol 7
1.3 Potentiel solaire en Algérie 7
1.4 L'énergie photovoltaïque 8
1.4.1 Historique 9
1.4.2 Principe de fonctionnement 10
1.4.3 Les différents types de cellules solaires 10
1.4.3.1 La Cellule multi-jonction 11
1.4.3.2 La Cellule en silicium monocristallin 11
1.4.3.3 La Cellule en silicium polycristallin 11
1.4.3.4 La Cellule photovoltaïque amorphe 11
1.4.4 Panneau photovoltaïque 11
1.4.5 Les différentes configurations des systèmes photovoltaïques 12
1.4.5.1 Système photovoltaïque raccordé au réseau 12
1.4.5.2 Systèmes photovoltaïques autonomes 13
1.4.6 Les avantages et les Inconvénients de photovoltaïque 15
a. Avantage du PV 15

b. Inconvénient du PV 16
1.5 Énergie éolienne 16
1.5.1 Historique 17
1.5.2 Les différents types d'éoliennes 18
1.5.2.1 Les éoliennes à axe horizontal 18
1.5.2.2 Les éoliennes à axe vertical 18
1.5.3 Principe de fonctionnement 19
1.5.3.1 Rotor 20
1.5.3.2 Nacelle 20
1.5.3.3 Tour 21
1.5.4 Les avantages et les Inconvénients de l'énergie éolienne 21
a. Avantages 21
b. Inconvénients 22
1.6 Systèmes de stockage 22
1.6.1 Les différents Types de batterie 22
1.7 Conclusion 23

Chapitre 2 : Modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien

2.1 Introduction 25
2.2 Choix des composants 25
2.2.1 Caractéristiques technique de chaque composant 25
2.3 Modélisation des composants du système 27
2.3.1 Modélisation du générateur photovoltaïque 27
2.3.1.1 Caractéristique Courant-Tension 30
2.3.1.2 Caractéristique puissance-tension 31
2.3.2 Influence des différents paramètres sur la caractéristique 1(v) 32
2.3.2.1 Influence de l'éclairement 32
2.3.2.2 Influence de la température 33
2.4 Association des cellules photovoltaïques 34
2.4.1 Modélisation du générateur éolienne 36
2.4.2 Modélisation du stockage 36
2.4.2.1 Modèle de la charge de la batterie 36
2.4.2.2Modèle de la décharge de la batterie 37

2.5 Modélisation du système de conversion 38
2.6 Conclusion 40

Chapitre 3 : Dimensionnement optimal par la méthode LPSP

3.1 Introduction 42
3.2 Définition du dimensionnement 42
3.3 Dimensionnement des systèmes d'énergie hybrides 43
3.4 Dimensionnement du système 44
3.5 Description de la méthode LPSP 44
3.6 Avantages de la méthode LPSP 46
3.7 Application de la LPSP à l'installation PV 47
3.8 Méthodologie adoptée 48
3.9 Dimensionnement du générateur photovoltaique 48
3.10 Conclusion 50

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

4.1 Introduction 52
4.2 Présentation du site et ressources météorologiques 52
4.2.1 L'emplacement du système hybride 52
4.2.2 Les données météorologiques 54
a. Irradiation 54
b. température 55
C. Vitesse de vent 55
4.2.3 Le profil de charge 56
4.3 Système d'étude 57
4.4 Les différents éléments du système 58
4.4.1 Générateur photovoltaïque 58
4.4.2 Générateur éolien 59
4.4.3 Les batteries 59
4.4.4 Régulateur de charge 60
4.5 Optimisation du système 60
4.5.1. Optimisation du banc des batteries 60
4.6 Résultats de l'optimisation 61
4.7 Conclusion 62

Conclusion générale..... 65

Liste des figures

Figure I.1 : Le spectre solaire 5

Figure I.2 : Les composantes du rayonnement solaire reçu au sol 7

Figure I.3 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur surface horizontale 8

Figure I.4 : Fonctionnement d'une cellule solaire 10

Figure I.5 : Différents types des cellules 11

Figure I.6 : Panneau photovoltaïque 12

Figure I.7 : Schéma d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution électrique 13

Figure I.8 : Schéma de principe d'un système PV autonome sans stockage 14

Figure I.9 : Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage 14

Figure I.10 : Système hybride 15

Figure I.11 : Les éoliennes 17

Figure I.12 : Les éoliennes à axe horizontal 18

Figure I.13 : Eolienne de type vertical 19

Figure I.14 : Composants d'une éolienne 19

Figure I.15 : Eléments d'une nacelle 21

Figure II.1 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque model idéal 27

Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode sans résistance parallèle 27

Figure II.3 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes sans résistance parallèle 28

Figure II.4 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes (à deux exponentielles) 28

Figure II.5 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode..... 29

Figure II.6 : Schéma bloc du GPV 29

Figure II.7 : Caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ d'un module photovoltaïque 31

Figure II.8 : Courbe $P_{PV} = f(V_{PV})$ d'un module photovoltaïque 32

Figure II.9 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{PV}=f(V_{PV})$..... 32

Figure II.10 : Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements 33

Figure II.11 : Caractéristique courant-tension pour différentes températures 33

Figure II.12 : Caractéristique puissance-tension pour différentes températures..... 34

Figure II.13 : Caractéristique résultants d'un groupement de Ns cellules en série 35

Figure II.14 : Caractéristique résultants d'un groupement de N_p cellules en parallèle 35

Figure II.15 : Évolution de la tension durant la charge d'un accumulateur au plomb 37

Figure II.16 : Caractéristique résultants d'un groupement de Ns cellules en série 38

Figure II.17 : Rendement de l'onduleur 39

Figure III.1: Algorithme graphique de la LPSP 49

Figure IV.1 : Localisation géographique de Tamanrasset 53

Figure IV.2: Localisation géographique d'Ain Amguel (Tamanrasset)..... 54

Figure IV.3: Evaluation de l'ensoleillement en (watt/m²) 54

Figure IV.4 : Evaluation de la température en (C°).....55

Figure IV.5 : Evaluation de vitesse de vent en (km/j) 55

Figure IV.6 : Evaluation du profil de charge en (watt).....57

Figure IV.7 : Schéma synoptique du système hybride étudié..... 58

Figure IV.8 : Evaluation de puissance photovoltaique (watt) en fonction de t(j). 59

Figure IV.9 : Evaluation de puissance éolienne en fonction de t. 59

Figure IV.10 : Evaluation de puissance de batterie (watt) en fonction de temps(j).....60

Figure IV.11 : Evaluation de puissance photovoltaique, éolienne et batterie (watt)en fonction de temps(j)…….. 62

Liste des tableaux

Tableau I-1:	Répartition du potentiel solaire en Algérie	8
Tableau I-2:	Types de batterie existant actuellement sur le marché	23
Tableau II-1:	Caractéristiques du panneau solaire choisi	25
Tableau II-2:	Tableau technique du convertisseur choisi	26
Tableau II-3:	Tableau technique de la batterie choisie	26
Tableau II-4:	Tableau technique de l'éolienne choisie	26
Tableau II-5 :	Caractéristiques de l'onduleur	26
Tableau IV-1:	Estimation des besoins énergétiques journaliers d'une journée Hivernale et estivale	56
Tableau IV-2:	Symboles pour tous les appareils électriques	57
Tableau IV-3 :	Nombre des panneaux PV en fonction de LPSP	61
Tableau IV-4:	les résultats des énergies.	61

Liste des abréviations

PV : **Photovoltaïque.**

GPV : **Générateur Photovoltaique.**

EPV : **Energie photovoltaïque.**

AC : **Courant alternatif (Alternative current).**

CC : **Courant continu.**

K : **Costant de Boltzman.**

LPSP : **Probabilité de perte d'energie (loss of power supply probability).**

LPS : **Perte d'energie (Loss of Power Supply).**

AH : **Ampère heur.**

WH : **Watt heur.**

Matlab: **MATrix LABoratory.**

DOD : **Profondeur de décharge.**

AUT : **Autonomie du système.**

ET : **Energie Total.**

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis le début du siècle, la demande mondiale en énergie n'a cessé de croître dans toutes les régions du monde. Cette tendance devrait se poursuivre, en raison de la croissance économique ainsi que de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant. Peu importe le scénario envisagé, il est prévu que la consommation énergétique continue d'augmenter.

La consommation d'énergie mondiale et dans notre pays ne cesse d'augmenter. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre [1].

En effet, la prise de conscience des problèmes tels que la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources a conduit à reconnaître la nécessité d'un développement économique respectueux de l'environnement dans lequel nous vivons. Il est devenu clair que nous devons trouver des solutions durables pour préserver notre planète et assurer un avenir meilleur pour les générations futures.

De nombreux pays ont adopté les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et l'énergie éolienne, pour réduire leur dépendance aux combustibles fossiles. Ces sources d'énergie renouvelables contribuent à la préservation de l'environnement et à la réduction de la pollution. C'est vraiment encourageant de voir ces avancées [2].

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre tout en réduisant notre dépendance aux ressources épuisables. Cependant, il est important d'accepter les fluctuations naturelles et parfois aléatoires de ces sources d'énergie. C'est un compromis nécessaire pour profiter de leurs nombreux avantages environnementaux.

L'utilisation de l'énergie solaire et éolienne en Algérie constitue une étape importante vers la réalisation d'un environnement durable et la fourniture de sources d'énergie propres. L'Algérie bénéficie d'un climat désertique avec un ciel clair et un fort ensoleillement, ce qui en fait un pays idéal pour l'énergie solaire. Les vents forts dans certaines zones côtières sont également considérés comme une excellente opportunité de produire de l'électricité à partir de l'énergie éolienne. Grâce à ces ressources renouvelables, l'Algérie peut atteindre une plus grande indépendance en matière de production énergétique et réduire les émissions nocives pour l'environnement. La production d'électricité, bien qu'elle puisse paraître anodine, entraîne des perturbations. Une utilisation excessive de certains modes de production peut accentuer ces effets nuisibles, rendant la diversification des sources énergétiques indispensable [3].

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables nécessite des solutions de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de ces ressources. Les applications de stockage sont variées : elles peuvent être stationnaires et connectées ou non au réseau, notamment dans les sites isolés intégrant une source renouvelable.

Un système hybride (éolien – photovoltaïque) de production d'électricité continue dans les régions isolées ne fournit pas seulement de l'énergie, mais favorise aussi le développement social et économique des zones rurales. La production de quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peut redonner espoir à un village ou une communauté.

Les systèmes hybrides éoliens – photovoltaïque avec stockage par batteries au plomb, choisies pour leur maturité technologique et leur faible coût, sont particulièrement bien adaptés à la production d'électricité renouvelable. L'optimisation du dimensionnement du stockage, basée sur la modélisation des composants du système et la charge d'utilisation, est cruciale.

Le générateur d'électricité d'origine renouvelable retenu pour notre étude est un système hybride éolien – photovoltaïque. Ce travail vise à maintenir un niveau de fiabilité grâce à un dimensionnement optimal de ce système. Pour cela, une méthode de dimensionnement optimal d'un système hybride de production d'électricité avec un niveau de fiabilité fixé est présentée.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux, en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale, pour aborder de manière exhaustive cette étude. Notre manuscrit est présenté de la manière suivante :

- ✓ Chapitre I : le concept théorique des énergies renouvelables, dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord, globalement l'énergie solaire. On terminera ce chapitre en citant les différentes configurations existantes actuellement des systèmes photovoltaïques/éoliennes.
- ✓ Chapitre II : Dans ce 2ème chapitre nous présentons la modélisation des constituants d'un système hybride PV/éolienne.
- ✓ Chapitre III : Dans le 3ème chapitre nous exposons la méthode de calcul pour L'optimisation du dimensionnement de systèmes photovoltaïques/éolienne autonomes basé sur le concept LPSP
- ✓ Chapitre IV : Ce chapitre présentera nous présentons les résultats de la simulation et de dimensionnement obtenus par la méthode LPSP.

Nous terminons par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1 :

Généralités sur les énergies renouvelables

1.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergie produites à partir de ressources naturelles renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau et la biomasse. Elles sont essentielles pour assurer un approvisionnement énergétique durable et respectueux de l'environnement.

Les types d'énergie renouvelables les plus utilisés et leurs utilisation dans la vie quotidienne :

- **L'énergie solaire** : produite en convertissant la lumière du soleil en énergie électrique. Elle pourrait couvrir environ de 15 000 fois notre consommation globale d'énergie ce qui donne un potentiel très important à l'échelle du besoin de l'activité humaine telle que la quantité d'énergie arrivée au sol, les panneaux solaires peuvent être installés sur les toits des maisons pour produire de l'électricité pour l'éclairage, les chauffages de l'eau et les appareils électroménagers se compte sur 10 000 Watts crête par mètre carré dans les zones tempérées et jusqu'à 14000 Watts crête par mètre carré lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.
- **L'énergie éolienne** : produite en utilisant le mouvement du vent pour générer de l'énergie électrique. Les éoliennes prouvent être utilisées pour générer de l'électricité pour alimenter des maisons, des entreprises et même des villes entières.
- **L'énergie hydraulique** : produite en exploitant la force de l'eau en mouvement pour générer de l'électricité. Les centrales hydroélectriques peuvent produire de l'électricité à partir de la force de l'eau, qui peut être utilisée pour l'éclairage et le fonctionnement des appareils électriques
- **L'énergie biomasse** : produire en brulant des matériaux organiques tels que le bois et les déchets pour produire de la chaleur ou de l'électricité. La biomasse peut être utilisée comme combustible pour le chauffage des maisons et des bâtiments ou comme source d'électricité dans les centrales électriques.

Le flux solaire reçu au niveau du sol dépend de plusieurs paramètres :

- ✓ L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre.
- ✓ La latitude du lieu de collecte.
- ✓ Son degré de pollution et son altitude.
- ✓ La période de l'année.
- ✓ L'instant considéré dans la journée.
- ✓ La nature des couches nuageuses.

Les zones les plus favorables sont répertoriées sous forme d'atlas et mettent en évidence des gisements solaires à la surface de la terre.

Pour mieux comprendre le mode de fonctionnement de cette énergie, nous allons parler dans ce chapitre d'une manière générale du gisement solaire, de la conversion photovoltaïque et des principaux éléments constitutifs d'un système photovoltaïque. Nous aborderons également l'énergie éolienne et ses principaux composants et systèmes de stockage.

1.2 Le rayonnement solaire

1.2.1 Le soleil

Le Soleil est une étoile naine jaune située au centre de notre système solaire. C'est la plus grande et la plus massive des huit planètes du système solaire. Le Soleil est composé d'hydrogène et d'hélium, et il produit son énergie par fusion nucléaire.

1.2.1.1 Caractéristiques du Soleil

- ✓ **Diamètre:** 1 392 000 km (environ 109 fois la largeur de la Terre)
- ✓ **Masse:** 333 000 fois la masse de la Terre
- ✓ **Température de surface:** 5 500 °C
- ✓ **Composition:** 73% d'hydrogène, 25% d'hélium, 2% d'autres éléments

1.2.2 Le spectre solaire

Le Soleil émet un rayonnement à large spectre (assez proche de celui d'un corps noir à 5250 °C2), qui inclut le domaine visible par l'œil humain (les rayons dans le visible représentent environ 43 % de l'énergie reçue). Le graphe représente (la figure (I.1)) le spectre d'irradiante solaire en fonction de la longueur d'onde au sommet de l'atmosphère (appelée AM0) et au niveau de la mer (appelée AM1.5). L'ensemble des sillons apparaissant dans le spectre visible forme les raies de Fraunhofer, tandis que le spectre au niveau de la mer présente des bandes d'absorption de l'atmosphère dans l'ultraviolet (notamment par l'ozone) et dans l'infrarouge (notamment par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone) [4]

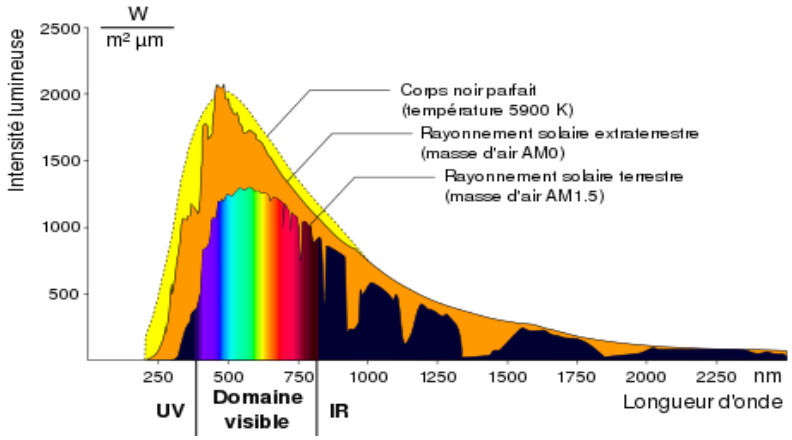


Figure I.1 : Le spectre solaire.

1.2.3 Le rayonnement solaire extraterrestre

Le rayonnement solaire extraterrestre, aussi appelé **constante solaire**, est la quantité d'énergie solaire par unité de surface reçue sur une surface plane perpendiculaire aux rayons du soleil en dehors de l'atmosphère terrestre. Sa valeur moyenne est d'environ **1367 W/m²** (ou 1367 watts par mètre carré).

Il est important de noter que cette valeur est une moyenne et que la quantité réelle de rayonnement solaire reçue à la surface de la Terre peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que:

- ✓ **La position du Soleil dans le ciel:** Le Soleil est plus haut dans le ciel en été qu'en hiver, ce qui signifie que la Terre reçoit plus de rayonnement solaire en été.
- ✓ **La latitude:** Les régions situées près de l'équateur reçoivent plus de rayonnement solaire que les régions situées près des pôles.
- ✓ **La couverture nuageuse:** Les nuages réfléchissent une partie du rayonnement solaire, ce qui diminue la quantité de rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre.
- ✓ **L'activité solaire:** L'activité solaire varie au fil du temps, ce qui peut entraîner des variations du rayonnement solaire reçu par la Terre.

Le rayonnement solaire extraterrestre est une source d'énergie importante pour la Terre. Il est à la base de la photosynthèse, qui est essentielle à la vie sur Terre. Il régule également le climat de la Terre en chauffant l'atmosphère et les océans.

Voici quelques utilisations du rayonnement solaire extraterrestre:

- ✓ **Production d'électricité solaire:** Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire de l'électricité photovoltaïque ou thermique.
- ✓ **Chauffage solaire:** Le rayonnement solaire peut être utilisé pour chauffer des bâtiments et de l'eau.
- ✓ **Dessalement:** Le rayonnement solaire peut être utilisé pour dessaler l'eau de mer.
- ✓ **Agriculture:** Le rayonnement solaire est essentiel à la croissance des plantes.

1.2.4 Les composantes du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire se décompose en trois composantes principales:

1.2.4.1 Le rayonnement direct

C'est la partie du rayonnement solaire qui arrive à la surface de la Terre en provenance directe du Soleil.

Il est responsable de l'échauffement de la surface de la Terre et de la production d'ombre.

La quantité de rayonnement direct dépend de la position du Soleil dans le ciel, de la latitude et de la couverture nuageuse.

1.2.4.2 Le rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement solaire qui est diffusée par l'atmosphère terrestre dans toutes les directions.

Il provient du ciel bleu et est responsable de la lumière ambiante.

La quantité de rayonnement diffus dépend de la quantité de nuages et d'autres particules dans l'atmosphère.

1.2.4.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est la partie du rayonnement solaire qui est réfléchie par la surface de la Terre.

La quantité de rayonnement albédo dépend du type de surface, par exemple, la neige réfléchit plus de rayonnement solaire que la forêt

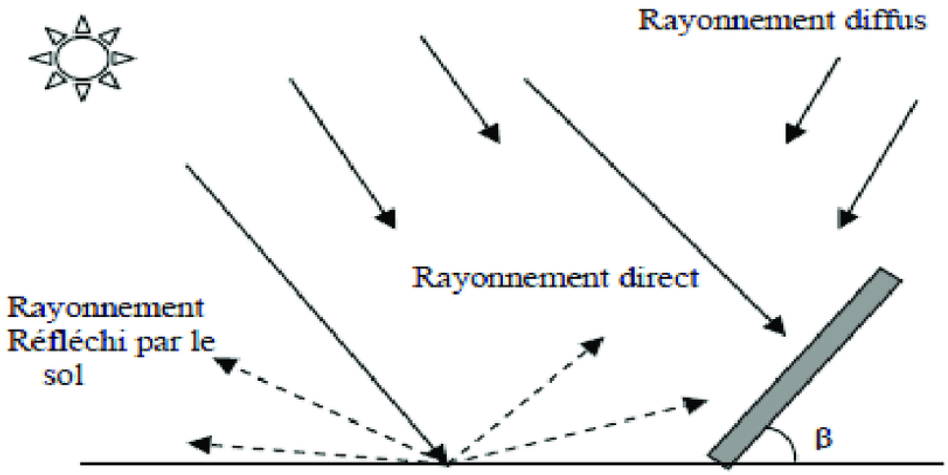


Figure I.2 : Les composantes du rayonnement solaire reçu au sol

1.3 Potentiel solaire en Algérie

L'étude de gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. Cette valeur peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7 KWh/m2/jour. Elle est repartie comme suit : Au Nord : 5,6kWh/m2/jour ; Au sud : 7,2kWh/m2/jour [5].

Tableau I.1 : Répartition du potentiel solaire en Algérie

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m2/an)	1700	1900	2650

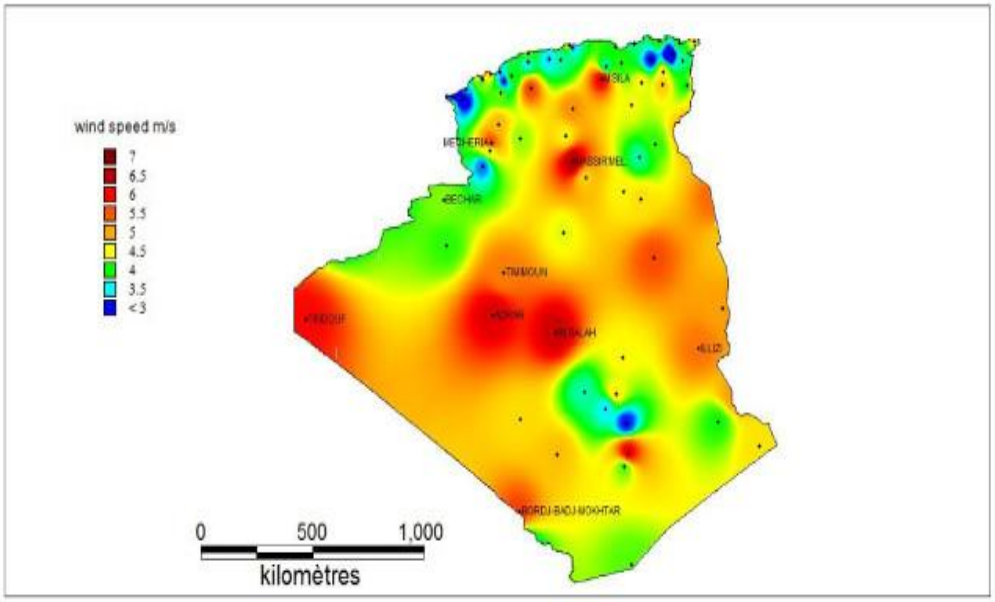


Figure I.3 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur surface horizontale

1.4 L'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des capteurs ou à des centrales solaires photovoltaïques. C'est une énergie renouvelable, car le Soleil est considéré comme une source inépuisable à l'échelle du temps humain. Sur l'ensemble de sa vie, dans des conditions idéales d'irradiation solaire (typiquement au Sahara ou sous d'autres climats désertiques proches de

L'équateur), un panneau photovoltaïque produit de 19 à 38 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage.

La cellule photovoltaïque, composant électronique de base du système, utilise l'effet photoélectrique pour convertir en électricité les ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module et ces modules regroupés entre eux forment une installation solaire. L'électricité est consommée, stockée sur place dans un système d'alimentation autonome ou injectée sur le réseau de distribution et de transport électrique.[6]

1.4.1 Historique

1839 : Le physicien français Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1887 : L'effet photoélectrique a été compris et présenté en 1887 par Heinrich Rudolf Hertz qui en publia les résultats dans la revue scientifique Annalen der Physik.

1905 : Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1905 et obtint le prix Nobel de physique sur ses travaux en 1921.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince des laboratoires BELL mirent au point la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de 4%, au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule photovoltaïque avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites Vanguard alimentés par des cellules photovoltaïques sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Wilmington dans l'Etat du Delaware, USA.

1983 : La première voiture alimentée par de l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

2000 : Entrée en application le 1er avril 2000 et modifiée en 2004 et en 2009, l'EEG Renewable Energy Sources Act (EEG) est le résultat de la transposition de la directive européenne relative à la promotion des énergies renouvelables dans le secteur de l'électricité.

2005 : En décembre 2005 mise en réseau de la première centrale solaire photovoltaïque du groupe Prime Energy à Weil am Rhein (Baden-Württemberg), Hegenheimerstrasse 17, 79576 Weil am Rhein. [7]

1.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

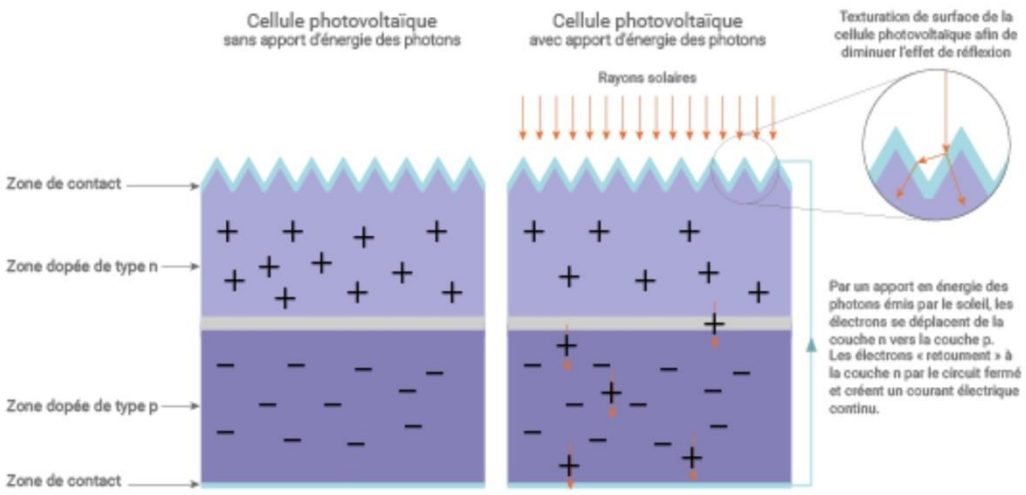


Figure I.4:.Fonctionnement d'une cellule solaire

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité. [8]

1.4.3 Les différents types de cellules solaires

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. La production des cellules

photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner environ 2 à 3 ans suivant sa technologie pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.

1.4.3.1 La Cellule multi-jonction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de convection.

1.4.3.2 La Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

1.4.3.3 La Cellule en silicium polycristallin

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

1.4.3.4 La Cellule photovoltaïque amorphe

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".



Figure I.5 : Différents types des cellules

Il y a d'autres types des cellules PV comme les cellules en matériaux organiques (rendement d'environ de 3,6%) et les cellules tandem [9].

1.4.4 Panneau photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque est un dispositif qui convertit la lumière du soleil en électricité. Il est constitué de plusieurs cellules photovoltaïques, qui sont des semi-conducteurs tels que le silicium. Lorsque la lumière du soleil frappe une cellule photovoltaïque, elle excite les électrons de

la cellule, les faisant circuler. Cela crée un courant électrique qui peut être utilisé pour alimenter des maisons, des entreprises ou d'autres appareils.

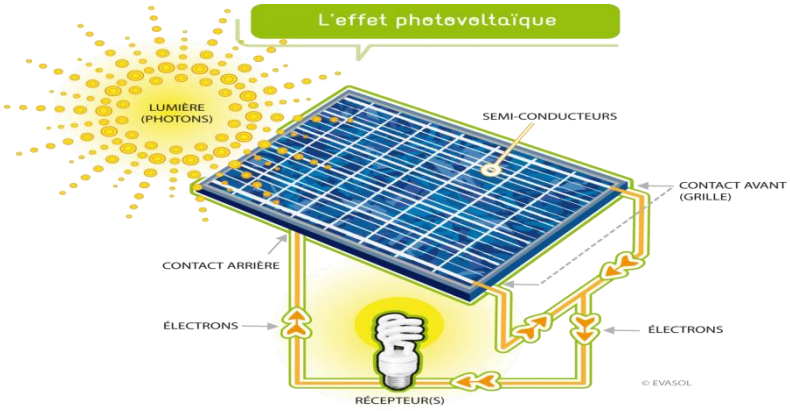


Figure I.6: Panneau photovoltaïque.

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, besoin de boite de dérivation qui regroupe le tous, Alors cette boite de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

1.4.5 Les différentes configurations des systèmes photovoltaïques

1.4.5.1 Système photovoltaïque raccordé au réseau

Le photovoltaïque raccordé au réseau est constitué de systèmes de production d'électricité photovoltaïque qui peuvent être centralisés (centrale solaire photovoltaïque) ou décentralisés (toits de maisons individuelles, de mairies, de granges, etc.).

On parle de photovoltaïque raccordé au réseau par opposition au photovoltaïque hors réseau qui peut être soit autonome, avec des batteries d'accumulateurs, soit hybride avec des batteries d'accumulateurs et une source d'énergie auxiliaire (Groupe électrogène, éolienne, turbine hydraulique).

Ces systèmes sont constitués de modules solaires photovoltaïques reliés entre eux (en série et en parallèle) et branchés sur un ou plusieurs onduleurs eux-mêmes connectés au réseau de distribution ou de transport d'électricité.[10]

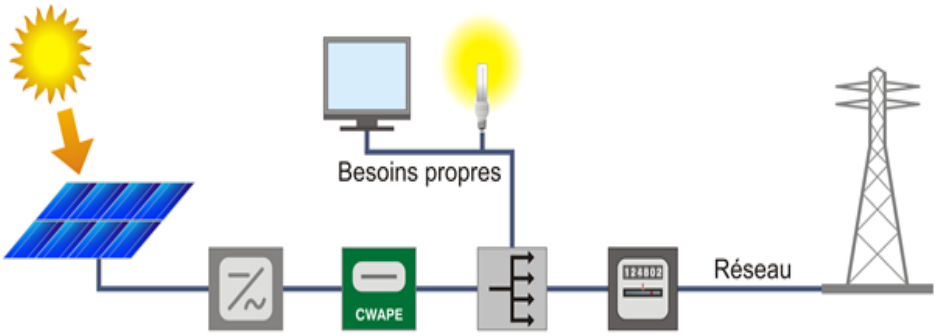


Figure I.7 : Schéma d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution Electrique.

1.4.5.2 Systèmes photovoltaïques autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau.

Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont :

a. Systèmes autonomes sans stockage

En journée, le générateur photovoltaïque alimente l'utilisation directement ou via un convertisseur Courant Continu/Courant Continu (CC/CC) ou Courant Continu/Courant Alternatif (CC/AC). La puissance délivrée à l'utilisation est fonction de l'ensoleillement.
Durant la nuit, l'utilisation n'est plus alimentée et donc est à l'arrêt. Les principales applications photovoltaïques fonctionnant au fil du soleil sont les suivantes : le pompage, la ventilation, la production de froid, le dessalement d'eau de mer, entre autres

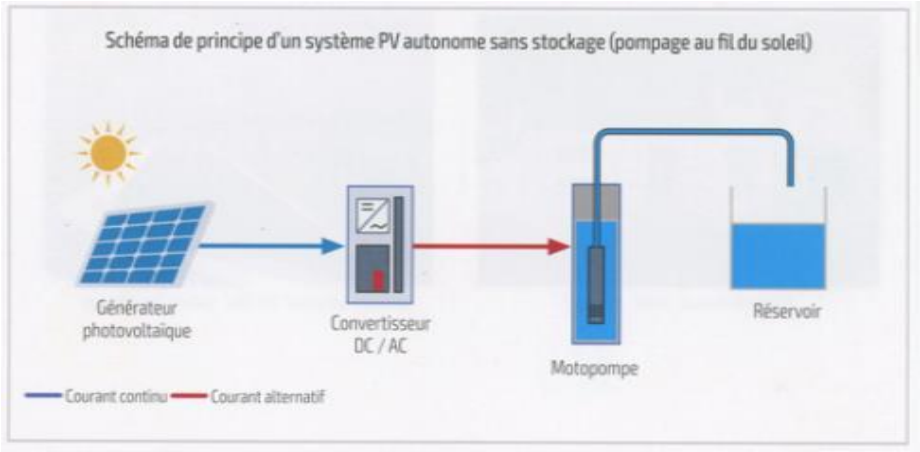


Figure I.8 : Schéma de principe d'un système PV autonome sans stockage

b. Systèmes autonomes avec stockage

En journée, le générateur photovoltaïque alimente les récepteurs courant continus en fonctionnement et charge la batterie de stockage. Un contrôleur de charge évite la surcharge de la batterie en cas de surproduction solaire. Durant la nuit et par mauvais temps, les récepteurs sont alimentés par la batterie. Un limiteur de décharge protège la batterie en cas de décharge profonde. En présence de récepteurs fonctionnant en alternatif, un onduleur autonome convertit la tension continue en tension alternative, permettant ainsi leur alimentation. [11]

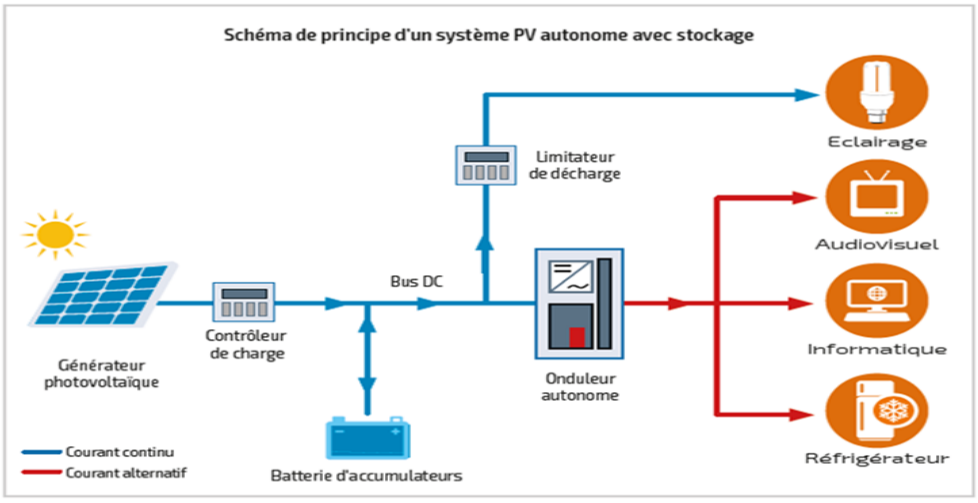


Figure I.9 : Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage

c. Système autonomes hybride

Une centrale hybride est un système complet d'alimentation électrique qui peut être facilement configuré pour répondre à un large éventail de besoins en énergie à distance. Le système comporte trois composants de base : la source d'énergie, la batterie et le centre de gestion de l'énergie. Les sources d'énergie hybrides peuvent inclure les éoliennes, les générateurs électriques à carburants

divers, les générateurs thermoélectriques et les systèmes solaires photovoltaïques. Utiliser des batteries permet un fonctionnement autonome en comblant la différence entre la production et l'utilisation de l'énergie. Le centre de gestion de l'énergie régule la production d'énergie de chaque source, contrôle la consommation d'énergie en classant les charges et protège la batterie des conditions extrêmes. [12]

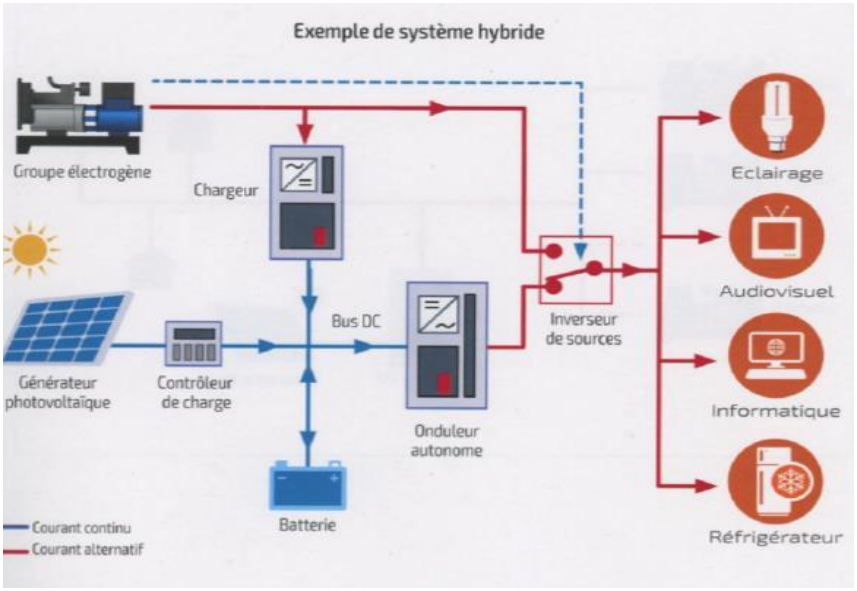


Figure I.10 : Système hybride

1.4.6 Les avantages et les Inconvénients du photovoltaïque

a. Avantage du PV

- ✓ Les traqueurs produisent plus d'électricité que leurs homologues fixes en raison de l'exposition directe accrue aux rayons solaires. Cette augmentation peut atteindre 10 à 25% en fonction de la localisation géographique du système de suivi.
- ✓ Il existe de nombreux types de suiveurs solaires, tels que les suivis à un axe et à deux axes, qui peuvent tous convenir parfaitement à un chantier unique. La taille de l'installation, les conditions météorologiques locales, le degré de latitude et les exigences électriques sont tous des facteurs importants pouvant influer sur le type de suivi solaire le mieux adapté à une installation solaire spécifique.
- ✓ Les suiveurs solaires génèrent plus d'électricité dans à peu près le même espace que celui requis pour les systèmes à inclinaison fixe, ce qui en fait l'outil idéal pour optimiser l'utilisation des sols.
- ✓ Dans certains États, certains services publics proposent des plans de tarification en fonction de la durée d'utilisation de l'énergie solaire, ce qui signifie qu'ils achèteront à un taux plus élevé l'énergie générée pendant les heures de pointe de la journée. Dans ce cas, il est avantageux de générer une plus grande quantité d'électricité pendant ces périodes de pointe

de la journée. L'utilisation d'un système de suivi permet de maximiser les gains d'énergie pendant ces périodes de pointe.

- ✓ Les progrès de la technologie et de la fiabilité des composants électroniques et mécaniques ont considérablement réduit les problèmes de maintenance à long terme des systèmes de suivi.

b. Inconvénients du PV

- ✓ Les suiveurs solaires sont légèrement plus chers que leurs homologues fixes, en raison de la technologie plus complexe et des pièces mobiles nécessaires à leur fonctionnement. Cela représente généralement une augmentation de 0,08 à 0,10 USD / W, en fonction de la taille et de l'emplacement du projet.
- ✓ Même avec les progrès en matière de fiabilité, la maintenance nécessite généralement plus de maintenance qu'un rack fixe traditionnel, bien que la qualité du suiveur solaire puisse jouer un rôle dans la quantité et la fréquence de cette maintenance.
- ✓ Les trackers sont un système plus complexe que le racking fixe. Cela signifie généralement que davantage de préparation du site est nécessaire, y compris des tranchées supplémentaires pour le câblage et un nivellement supplémentaire.
- ✓ Les projets de suivi à axe unique nécessitent également une attention supplémentaire sur la stabilité et la bancabilité des entreprises. En ce qui concerne le financement de projets, ces systèmes sont plus complexes et sont donc considérés comme présentant un risque plus élevé du point de vue d'un financier.
- ✓ Les suiveurs solaires sont généralement conçus pour les climats avec peu ou pas de neige, ce qui en fait une solution plus viable dans les climats plus chauds. Le rayonnage fixe s'adapte plus facilement aux conditions environnementales difficiles que les systèmes de suivi.
- ✓ Les systèmes de suivi fixes offrent une plus grande adaptabilité sur le terrain que les systèmes de suivi à axe unique. Les systèmes fixes peuvent généralement accueillir jusqu'à 20% de pentes dans la direction est / ouest, tandis que les systèmes de suivi offrent généralement moins de pente, généralement autour de 10% dans la direction nord / sud.
- ✓ Globalement, les suiveurs solaires sont des installations très efficaces et conviennent parfaitement aux grands et aux petits projets, étant donné l'emplacement et les conditions du site. [13]

1.5 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie

permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent. [14]



Figure I.11: les éoliennes.

1.5.1 Historique

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau, Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant Jésus-Christ environ.

La Première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant Jésus-Christ En Europe, ce n'est qu''au VIIème siècle que l'on voit apparaître les premiers moulins à vent. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de moulins, ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés.

A l'arrivée de l'électricité donne l'idée au britannique Lord Kelvin en 1802 de songé pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. En effet il essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les «aérogénérateurs ». Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs,

« Malheureusement », à cette époque, le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à un niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne. Dès 1973, le processus inverse a, petit à petit, relancé les programmes d'études et de réalisation d'aérogénérateurs. Mais les budgets de recherche et de développement, ainsi que les aides gouvernementales fluctuent avec le prix du baril de pétrole, et les aides accordées aux autres énergies (photovoltaïque en particulier). Toutefois au court des dernières années se dessine une nette tendance au développement de « fermes éoliennes » ou « parcs éoliens » raccordés aux réseaux de distribution

avec les machines de 300KW à 1.5MW. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon.

Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes. [15]

1.5.2 Les différents types d'éoliennes

1.5.2.1 Les éoliennes à axe horizontal

L'éolienne horizontale est le type d'éolienne le plus « classique », celui que l'on aperçoit le plus souvent au bord des routes et qui incarne parfaitement l'image de cette énergie renouvelable. Cette éolienne capte le vent grâce à des pales assemblées sous forme d'hélice. Ces pâles tournent autour d'un mât qui se situe horizontalement par rapport au sol, ce qui explique le nom de cette éolienne.

Dans ce type d'éolienne, la force des hélices en rotation permet d'actionner un générateur qui est situé sur le haut de l'éolienne. Le grand avantage de cette éolienne est son rendement, notamment quand elle comprend un système d'orientation des pâles en fonction du vent. Ces éoliennes sont également jugées plus solides et engendrent de faibles coûts d'entretien. L'inconvénient principal de ces éoliennes est le bruit qu'elles engendrent. De plus, la complexité d'installation en fonction de la hauteur du mât est à prendre en compte au moment d'opter pour ce mécanisme. [16]



Figure I.12 : Les éoliennes à axe horizontal

1.5.2.2 Les éoliennes à axe vertical

Contrairement à l'éolienne horizontale, l'éolienne verticale tourne autour d'une tige positionnée de manière verticale. L'un des principaux atouts de ce type d'éolienne est de réussir à capter des vents faibles et de produire de l'énergie même avec une vitesse de vent plus légère. Parmi les éoliennes verticales, deux types se démarquent aujourd'hui sur le marché :

- ✓ L'éolienne Darrieus

L'éolienne Darrieus est une éolienne qui se base sur un rotor en H, cylindrique ou hélicoïdale, qui tourne autour d'une tige fixe. Ce type d'éolienne verticale a de nombreux avantages dont celui de pouvoir être installé dans des endroits très éventés et de faire très peu de bruit comparé aux autres éoliennes du marché. L'inconvénient de ce type d'éolienne est d'avoir besoin d'un vent relativement fort pour commencer à tourner et donc à produire de l'énergie.

- ✓ L'éolienne Savonius

Ce type d'éolienne a l'avantage d'être particulièrement simple à installer car peu encombrante. Le principe consiste à ce que deux demi-cylindres tournent, s'entraînant l'un et l'autre, et ce même avec un vent très léger. Outre un esthétisme très design qui permet facilement aux installateurs de se projeter avec cette éolienne, l'éolienne Savonius peut très bien fonctionner avec de très faibles vents, ce qui n'est pas le cas avec l'éolienne Darrieus. [16]

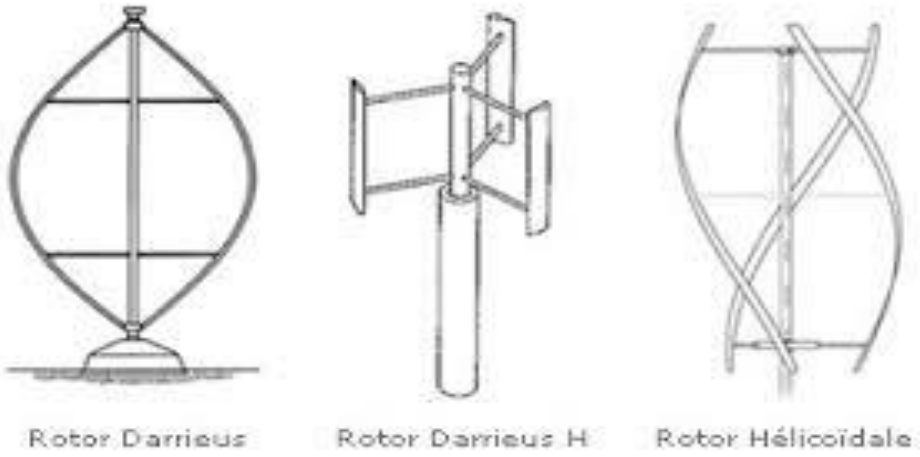


Figure I.13 : Eolienne de type vertical

1.5.3 Principe de fonctionnement

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour

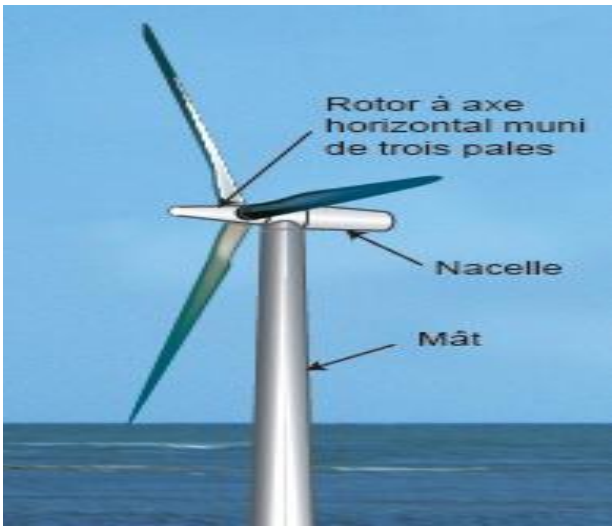


Figure I.14 : Composants d'une éolienne.

1.5.3.1 Rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3.

1.5.3.2 Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

- ✓ Multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- ✓ L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- ✓ Génératrice : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- ✓ Contrôleur électronique : chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts in stationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.
- ✓ Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- ✓ Dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance [17,18].

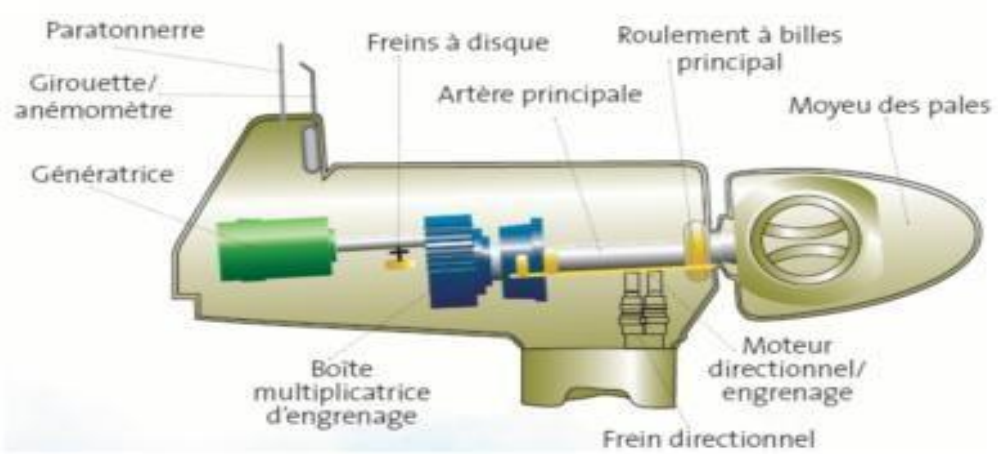


Figure I.15 : Eléments d'une nacelle.

1.5.3.3 Tour

Son rôle est d'une part de supporter ensemble rotor et nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor et nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation. Trois grands types de tour peuvent se rencontrer:

- ✓ **Tour mât haubané** : de construction simple et moins coûteuse mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.
- ✓ **Tour en treillis** : sont les moins chères, mais souvent mal acceptées et très peu utilisés. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain
- ✓ **Tour tubulaire** : est beaucoup plus élégant, mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané. [19]

1.5.4 Les avantages et les Inconvénients de l'énergie éolienne

a. Avantages

- ✓ L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles.
- ✓ L'énergie éolienne n'est plus non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs donc on connaît la durée de vie.

- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent facilement. [19]

b. Inconvénients

- ✓ L'impact visuel. ça reste néanmoins un thème subjectif.
- ✓ Le bruit: le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisé au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci évitent les aérogénérateurs.
- ✓ La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastiques, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne [19]

1.6 Systèmes de stockage

Le stockage de l'énergie consiste à mettre en réserve une quantité d'énergie provenant d'une source pour une utilisation ultérieure. Il a toujours été utile et pratiqué, pour se prémunir d'une rupture d'un approvisionnement extérieur ou pour stabiliser à l'échelle quotidienne les réseaux électriques, mais il a pris une acuité supplémentaire depuis l'apparition de l'objectif de transition écologique. Stocker de la chaleur ou de l'électricité permet ainsi de lisser les irrégularités de production et de consommation, dans le contexte de développement des énergies renouvelables et propres mais intermittentes, telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

On s'intéresse ici principalement à l'opération consistant à créer un stock à partir d'énergie disponible, et non directement à la gestion des stocks (notamment des stocks d'énergies fossiles), ni au déstockage. [20]

1.6.1 Les différents Types de batterie

Les différents Types de batterie existant actuellement sur le marché sont regroupés dans le tableau (I.2) suivant [21]:

Tableau I.2 : Types de batterie existant actuellement sur le marché

Type de batterie	Propriétés	Puissance Inférieure Wh / kg	Coût
Plomb – acide	Fiable, recyclable, Avec entretien	35	Pas trop chère
Scellée plomb-	acide Entretien nul, utilisée Dans n'importe quelle position	39	Pas trop chère
Bipolaire plomb – acide	Recharge rapide Permise et surtout durable	50	Très chère
Nickel – Cadmium	Toxique, effet de mémoire	45	Très chère
Nickel – Fer Non	toxique, durable	55	Très chère
Nickel – Métal	Hydrure Non toxique, durable	90	Très chère
Zinc – Bromure	Analogue à la précédente mais très toxique	90	Très chère
Sodium – Sulfure	Fonctionne à 300 °C D'où danger d'incendie	110	Très chère
Lithium – Ion (SAFT)	Sûre, puissante, formes diverses	150	Très chère

1.7 Conclusion

Dans cette section, nous avons abordé les divers types de rayonnement solaire (direct, diffus, albédo et global) ainsi que des concepts importants sur la disponibilité solaire en Algérie. Ensuite, nous avons discuté du fonctionnement des systèmes photovoltaïques et éoliens et de leurs principes de base.

Chapitre 2 :

Modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien

2.1 Introduction

La modélisation d'un système hybride photovoltaïque-éolien est un processus crucial pour comprendre et prédire le fonctionnement de ce type de système. En général, un système hybride photovoltaïque combine des panneaux solaires avec d'autres sources d'énergie, telles que des générateurs diesel ou des batteries, pour fournir de l'électricité de manière plus fiable et efficace. La modélisation implique la création de représentations mathématiques et informatiques du système, en prenant en compte des paramètres tels que l'ensoleillement, la capacité des batteries, les pertes de conversion, etc. Cela permet aux concepteurs et aux ingénieurs d'optimiser le système pour répondre aux besoins énergétique spécifiques.

2.2 Le choix des composants

2.2.1 Caractéristiques techniques de chaque composant

Chaque composant électrique représenté se caractérise par des caractéristiques techniques que nous avons classées dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Caractéristiques du panneau solaire choisi [22]

Générateur PV PST 300-24/CP	**Valeur**
Puissance max Pmpp	300W
Courant à puissance max. Impp	8.61 A
Tension à puissance max. Vmpp	35 V
Courant de court-circuit Isc	9.6 A
Tension en circuit ouvert Voc	46 V
Rendement de puissance	17.5%
Coefficient de température de Voc (%)	-0,32%C
Coefficient de température d'Isc (%)	+0,05%C
Coefficient de température d'Isc (%)	+0,05%C
Coefficient de température de Vmpp (%)	-0,42%C
Résistance aux impacts (grêle)	23 m/s, 7,53 g
Nombre de cellules couplées en Série	72
Température de fonctionnement	-40°C à +85°C
Type de cellules	Polycrystalline
La surface de PV	1200e-3*526e^{-3} m²

Tableau II.2. Tableau technique du convertisseur choisi [23]

Convertisseur R5 Smat Solar	**Valeur**
Puissance du convertisseur à 25°C	Augmentation linière de 4800W à 46V_{cc} de 5300W à52V_{cc}
Puissance du convertisseur à 40°C/65°C	4500/3000W
Rendement	95%
Tension de décharge	57.6V
Tension de charge	55.2V
Température de fonctionnement	-40 à +65 °C

Tableau II.3. Tableau technique de la batterie choisie [24]

Concorde (PVX-890T)	**Valeur**
La capacité nominale	102Ah
Tension nominale	12V
Le Coût	235 Dollars
Rendement de charge	0.85
Température de fonctionnement	Décharge -20°C 60°C
	Charge 0 °C 50°C

Tableau II.4. Tableau technique de l'éolienne choisie [25]

Eolienne (Whisper 200)	**Valeur**
Diamètre rotor	2.7m
Poids	39.46 kg
Vitesse de vent de démarrage	3,1m/s
Vitesse de vent maximum	55 m/s
Puissance nominale	1000W
Nombre de pales	3

Tableau II.5. Caractéristiques de l'onduleur [26]

Onduleur	**Valeur**
Tension d'entrée	12V, 24V ou 48V
Tension de sortie	220 AC à 50Hz
Le rendement	>95% en fonctionnement nominal.
La consommation en mode veille	2 ou 3% de la puissance nominale.
Les protections	Court-circuit charge, chute de tension coté batterie.
Prix	Varie selon le type et la puissance de charge
La puissance maximale	4200 watt

2.3 Modélisation des composants du système

2.3.1 Modélisation du générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est composé de cellules photovoltaïques, ces dernières, lors de leur exposition au soleil produisent de l'électricité. Ces cellules sont considérées écologiques grâce an raison de leur aspect non polluant. Ainsi elles n'ont pas besoin d'être entretenues

- ✓ **Modèle idéal**

Elle est modélisée comme une source de courant (Iph) qui est directement proportionnelle à l'éclairement lumineux, et cette source est couplée en parallèle avec une diode qui représente la jonction PN.

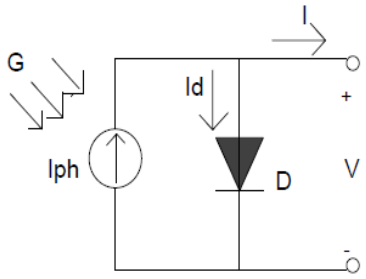


Figure II.1: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque modèle idéal

- ✓ **Modèle à une diode sans résistance parallèle**

Le modèle à une diode sans résistance parallèle pour une cellule photovoltaïque inclut une source de courant proportionnelle à l'éclairement incident, représentant le courant photo généré, en parallèle avec une diode qui modélise les caractéristiques de la jonction PN Le modèle à une diode sans résistance parallèle pour une cellule photovoltaïque inclut une source de courant proportionnelle à l'éclairement incident, représentant le courant photo généré, en parallèle avec une diode qui modélise les caractéristiques de la jonction PN.

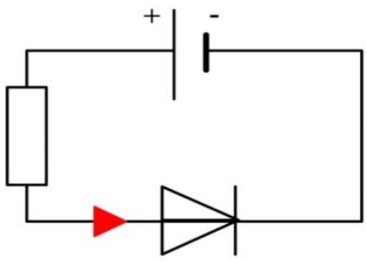


Figure II.2: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode sans résistance parallèle

✓ **Modèle à deux diodes sans résistance parallèle**

Le modèle à deux diodes sans résistance parallèle pour cellules photovoltaïques inclut une source de courant photo généré et deux diodes en parallèle, représentant les différents mécanismes de recombinaison dans la cellule.

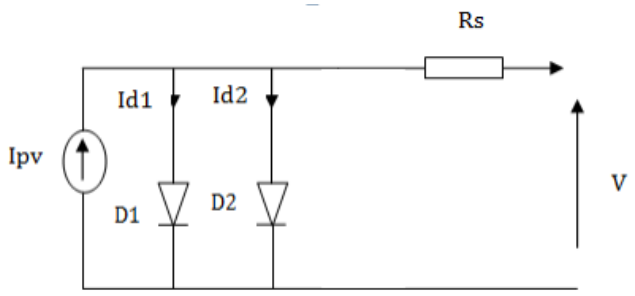


Figure II.3: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes sans résistance parallèle

✓ **Modèle à deux diodes (à deux exponentielles)**

Le modèle à deux diodes à deux exponentielles pour les cellules photovoltaïques utilise deux diodes, chacune avec deux termes exponentiels, pour mieux capturer les caractéristiques non idéales de la cellule. Cela permet une analyse plus précise des performances sous diverses conditions.

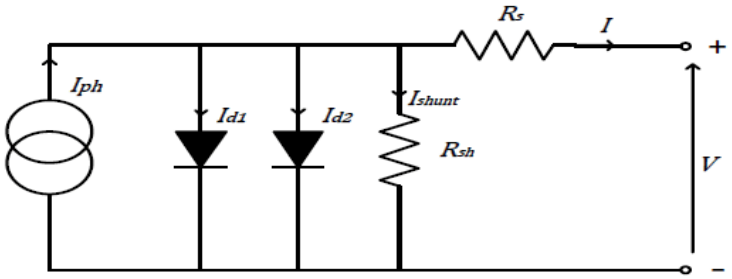


Figure II.4: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes (à deux exponentielles)

✓ **Modèle à une diode [27]**

Le modèle à une diode est le modèle le plus classique de la littérature. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, deux résistances (Rs, Rp) pour les pertes, le modèle d'une cellule est celui de la figure ci-dessous (II.5).

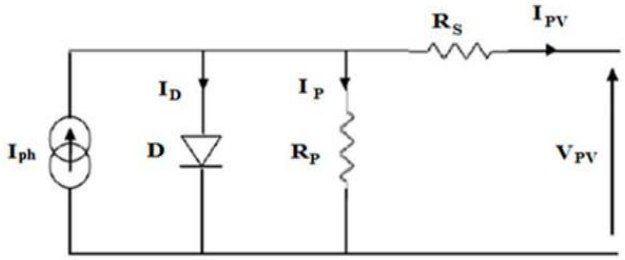


Figure II.5: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrée sont : E_S- ensoleillement dans le plan des modules [W/m^2] et T_j- température de jonction de la cellule [°C]. Les deux variables de sortie sont: I_{PV}- courant fourni par le groupe de modules [A] et V_{PV}-la tension aux bornes du groupe de modules [V].

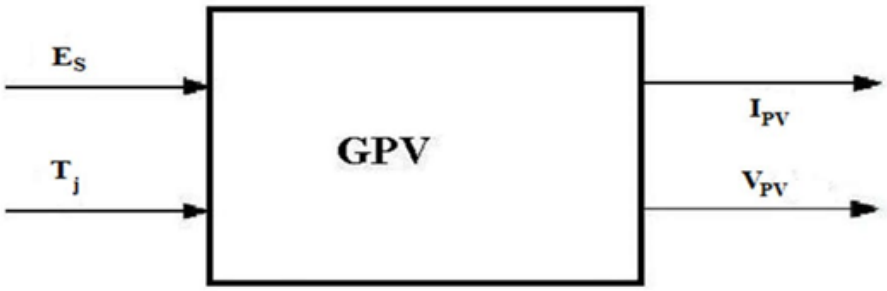


Figure II.6: Schéma bloc du GPV.

A partir de la figure (II.6) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_D - I_P \quad \text{(II-1)}$$

Le courant dans la résistance R_P est donné par :

$$I_p = \frac{Vpv}{Rp} \quad \text{(II-2)}$$

Le photo-courant Iph est donné par :

$$I_{Ph} = P_1\,(1 + P_2\,(E_S - E_{Sréf}) + P_3\,(T_j - T_{jréf})) \quad \text{(II-3)}$$

La température de jonction est donnée par :

$$T_j = T_a + (\frac{Noct-20}{800}) \quad \text{(II-4)}$$

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_0\,[exp\,(\frac{q}{KAnsTj}\,(V_{PV} + R_S I_{PV})) - 1] \quad \text{(II-5)}$$

Le courant de saturation dans la diode est donné par :

$$I_0 = P_4\,T_j^3 exp\,(\frac{Eg}{KTj}) \quad \text{(II-6)}$$

On obtiendra alors :

$$I_{pv}=P_1E_s\ (1+P_2(E_s-E_{sréf})+P_3\ (T_j-T_{jréf}))-P_4T_j^3\exp\left(\frac{Eg}{KTj}\right)*[\exp\left(\frac{q}{KAnsTj}(V+R_sI)\right)-1]-\frac{V}{Rp} \quad \text{(II-7)}$$

I_{PV} : Le courant de cellule.

V_{PV}: La tension de cellule.

R_S: La résistance série de la cellule [Ω].

E_S: L'ensoleillement [W/m^2].

$E_{Sréf}$: L'ensoleillement de référence [W/m^2].

T_j : La température de jonction de la cellule [°C].

$T_{jréf}$: La température de jonction de référence [°C].

T_a : La température ambiante [°C].

q: La charge d'électron e = 1.6 *10^{-19} C.

I_0: Courant de saturation de la diode [A].

K : La constante de Boltzmann (1.3854*10-23 JK^{-1}).

k_S: Nombre total de cellules connectées en séries et/ou en parallèles.

A: Coefficient d'idéalité de la cellule.

E_g: Energie de gap.

N_{0CT}: La température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire [°C].

P_1, P_2, P_3, P_4 : Paramètres constants.

2.3.1.1 Caractéristique Courant-Tension

La courbe caractéristique d'un panneau photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produise en fonction de la tension à ses bornes, depuis le court-circuit (tension nulle correspondante au courant maximal) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de panneau).

La figure (II.7) représente la courbe I = f(V) d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température une intensité rayonnante de 1000 W/m^2et une température de 25°C.

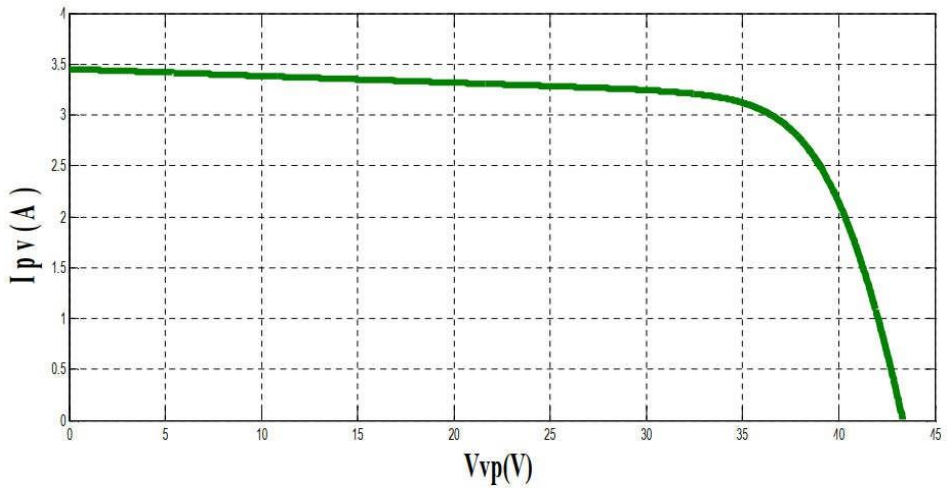


Figure II.7: Caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ d'un module photovoltaïque **[29]**.

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, lemodule photovoltaïque est considéré comme une source de puissance.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point P_{mpp} où la puissance setrouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée [29].

2.3.1.2 Caractéristique puissance –tension

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement standard (éclairement de 1000W/m^2 température de 25 °C) la puissance électrique P_{PV} disponible aux bornes d'un panneau photovoltaïque est égale au produit du courant photovoltaïque fourni I_{PV} par la tension à cesbornes donnée V_{PV}.

La Puissance délivrée par le module a pour expression : $P_{PV} = V_{PV} * I_{PV}$ (II.8)

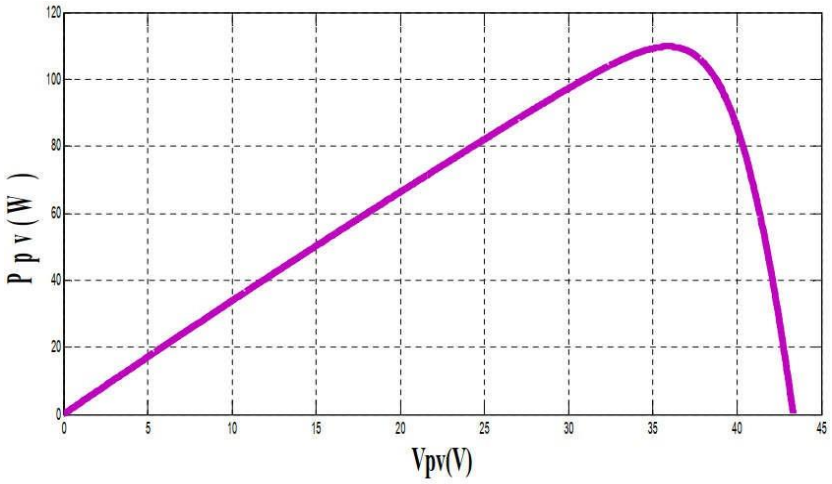


Figure II.8: Courbe $P_{PV} = f(V_{PV})$ d'un module photovoltaïque **[29]**.

Cette courbe passe par un maximum de puissance (P_{opt}), à cette puissance correspond une tension V_{opt} et un courant I_{opt} [29].

2.3.2 Influence des différents paramètres sur la caractéristique 1(v)

2.3.2.1 Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Les figures (II.9) et (II.10) représentent la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV pour une température constante de (25°C) et pour différente intensité rayonnante de (400, 600, 800 et 1000W/m^2).

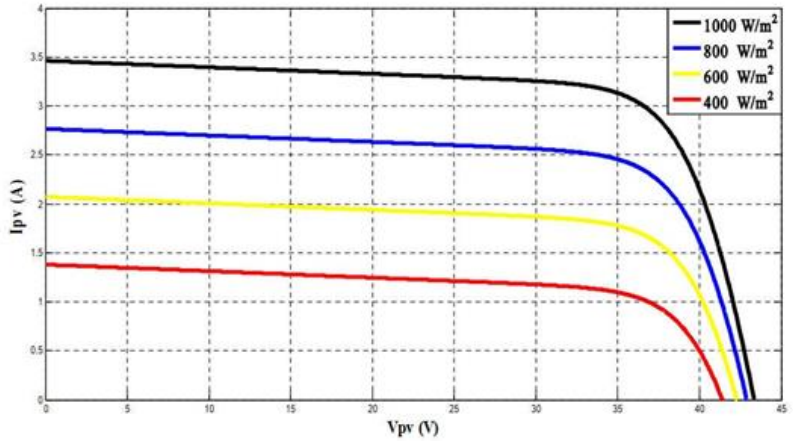


Figure II.9: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{PV}=f(V_{PV})$ **[29]**.

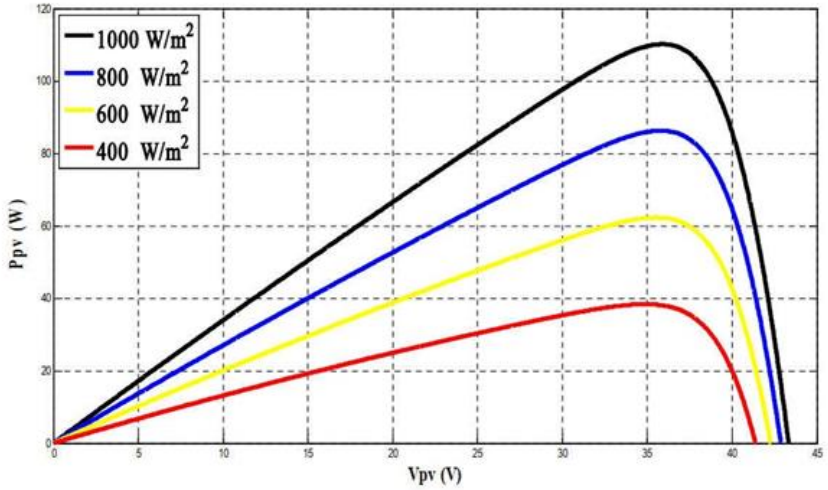


Figure II.10: Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements **[29]**.

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste presque identique même à faible éclairement.

Et pour la caractéristique puissance-tension l'éclairement est proportionnel à la puissance optimal par-contre la tension du circuit ouvert ne varie pas beaucoup et reste quasiment identique.

D'après les résultats de la simulation on peut dire que les performances d'un générateur PV sont fortement influencées par les conditions météorologiques, particulièrement l'ensoleillement et la température. Cela nécessite donc une commande pour extraire le maximum de puissance quelque-soit ces paramètres [29].

2.3.2.2 Influence de la température

Les figures (II.11) et (II.12) présentent respectivement des courbes courant-tension et puissance-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule photovoltaïque (25, 50, 75, et 90°C) :

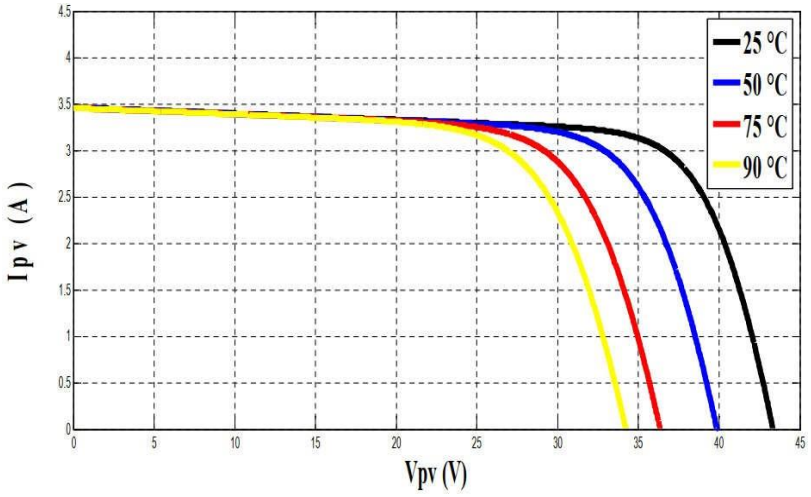


Figure II.11: Caractéristique courant-tension pour différentes températures **[26]**.

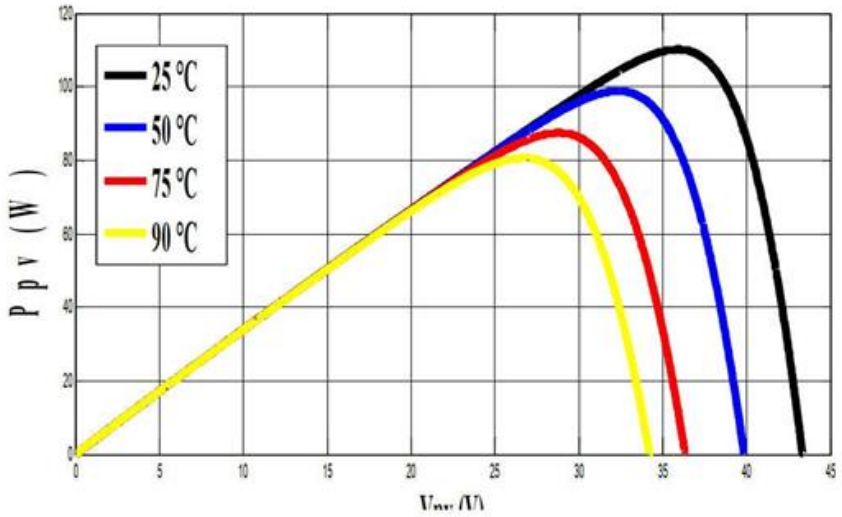


Figure II.12: Caractéristique puissance-tension pour différentes températures **[29]**.

On constate que la température influe sur la tension de circuit ouvert et non sur le courant decourt-circuit de la cellule. Suivant les figures (II.11) et (II.12), on constate que lorsque la température croit à irradiation constante (1000W/m^2) la tension de circuit ouvert V_{co} décroît fortement et le courant de court-circuit I_{cc} augmente légèrement. L'augmentation de la température se traduit au total par une diminution de la puissance maximale disponible

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25°C [29].

2.4 Association des cellules photovoltaïques

En associant les cellules photovoltaïques en série ou en parallèle, on peut construire un module (générateur) photovoltaïque selon le besoin des applications visées. Les deux types deregroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. La puissance disponible en sortie du module photovoltaïque est donnée par : [30]

$$P_{pv} = N_S * V_{pv} * N_p * I_{pv} \quad \text{(II-9)}$$

Avec:

N_s : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en série.

N_p : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en parallèle.

✓ Mise en série

Une association de N_s cellules permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule (figure II.13). L'équation (II.10) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules.

$$I_{cc,\,ns} = I_{cc} \qquad \text{(II-10)}$$

$$V_{c0,\,ns} = N_s * V_{c0}$$

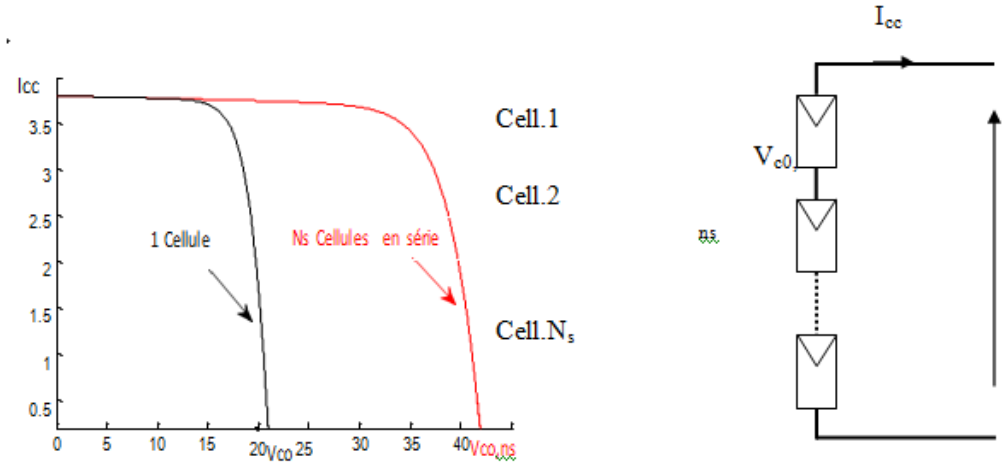


Figure II.13: Caractéristique résultants d'un groupement de Ns cellules en série.

✓ **Mise en parallèle**

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants (Figure II.14). L'équation (II.11) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules.

$$I_{cc,\,np} = I_{cc} \qquad \text{(II-11)}$$

$$V_{c0,\,np} = N_s * V_{c01}$$

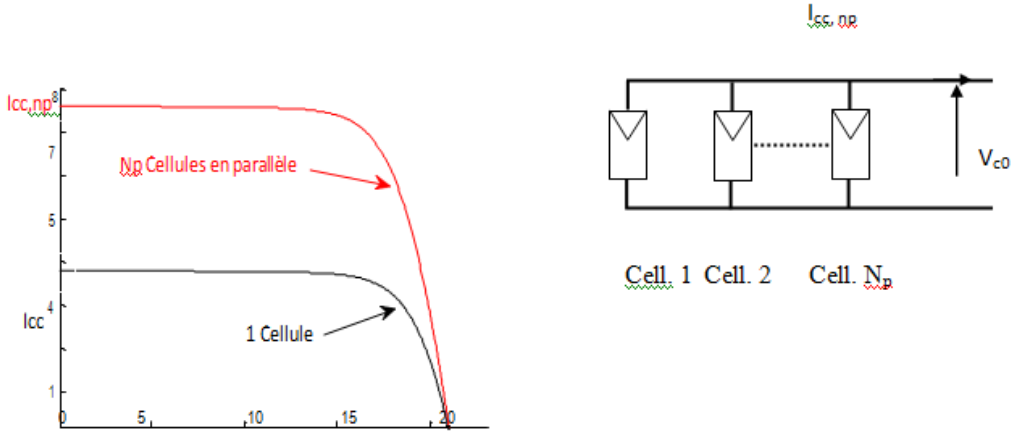


Figure II.14: Caractéristique résultants d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

2.4.1 Modélisation du générateur éolien

Pour une éolienne, si la vitesse du vent dépasse la vitesse d'enclenchement, l'éolienne commence à produire de l'énergie. Si la vitesse du vent est égale ou supérieure à la vitesse nominale du vent de l'éolienne, le générateur produira une puissance constante. Cependant, si la vitesse du vent dépasse la vitesse de coupure de l'éolienne, l'éolienne cesse de générer pour protéger l'éolienne et le composant contre les dommages. La puissance générée à partir de chaque temps t de l'éolienne est estimée par [25].

$$\text{Péol(t)} = \begin{cases} 0 \\ \text{Pr-wt} * \frac{\text{V}(t)\text{-Vcut-in}}{\text{Vr-Vcut-in}} \\ \text{Pr-wt} \end{cases} \qquad \text{(II-12)}$$

Sujet à

$V\ (t) \leq V_{cut-in}$ OR $(t) \geq V_{cut-out}$

$V_{cut-in} < V(t) < V_r$

$V\ (t)$ est la vitesse du vent au temps t (m/s), P_{r-wt} est la puissance nominale de l'éolienne en kW, et,$_{-out}$,V_{cut-in} et Vr sont respectivement la vitesse de coupure, V_{cut-in} et la vitesse nominale de l'éolienne (m / s). Si le nombre d'éoliennes est N_{Wt}, alorsla puissance totale produite est modélisée comme [25].

$$\text{P}_{\text{wtotal}}(t) = N_{Wt} \times \text{P}_{\text{wt}}(t) \qquad \text{(II-13)}$$

2.4.2 Modélisation du stockage

Le banc de batteries pour le stockage d'énergie est dimensionné pour satisfaire la demande de charge au cours de la période de non-disponibilité de la source d'énergie renouvelable, généralement connu sous le nom de 'jour d'autonomie'. Le nombre de jours d'autonomie varie généralement de 1 à 3 jours. Le modèle de stockage d'énergie représenté dans une installation photovoltaïque est une batterie Concorde (PVX-890T). Au fil du temps, de nombreux modèles de charge de batterie ont été développés.

Dans notre étude, nous avons employé un modèle décrit par (Bogdan et Salameh, 1996) pour estimer la capacité de stockage en fonction de la puissance générée par le panneau solaire et la demande en énergie.

2.4.2.1 Modèle de la charge de la batterie

Quand la puissance de générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps t peut être décrite par [31] :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1).(1-\sigma) + (P_{pv}(t) - P_L(t)/\eta_{ond}).\eta_{bat} \qquad \text{(II-14)}$$

$C_{Bat}(t)$ et $C_{Bat}(t-1)$ sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t) et (t-1) respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontané, P_{pv} est la puissance du générateur P_V, P_L est la charge demandée au temps t, η_{and} et η_{Bat} sont le rendement de l'onduleur et de la batterie successivement.

Pendant la charge de la batterie, le rendement est 0.65–0.85 selon le chargeant courant, par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie a été mis égal à 1.

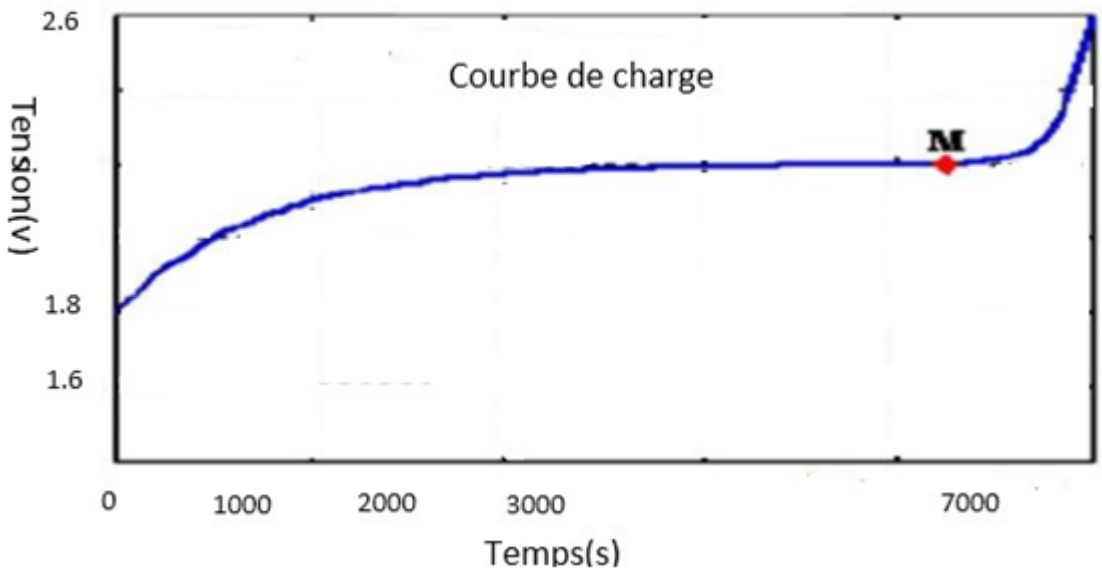


Figure II.15: Évolution de la tension durant la charge d'un accumulateur au plomb.

2.4.2.2 Modèle de la décharge de la batterie

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut être exprimée comme suite [31] :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1).(1-\sigma) + (P_L(t)/\eta_{ond} - P_{pv}(t)) \qquad \text{(II.15)}$$

Est sujette aux contraintes suivantes :

$$C_{Bat}\,min \leq C_{Bat}(t) \leq C_{Bat}\,max.$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la Batterie (C_{Bat} min = C_{Bat} max), et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge (DOD) [31]:

$$C_{Bat}\,min = DOD.\,C_{Bat}.N \qquad \text{(II.16)}$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge, $SOC_{min} = 1 - DOD$ Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50% [31].

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie. Elle peut être estimée par la relation suivante:

$$C_{Bat} = \frac{EL.Na}{\eta_{Bat}.F_{dech}.DOD}[WH] \qquad \text{(II-17)}$$

$$C_{Bat} = \frac{Cbat}{Vb}[WH] \qquad \text{(II-18)}$$

C_{Bat} : La capacité de stockage de la batterie.

N_a : Le nombre de jours d'autonomie.

V_b : La tension de la batterie.

DOD : La profondeur de la décharge.

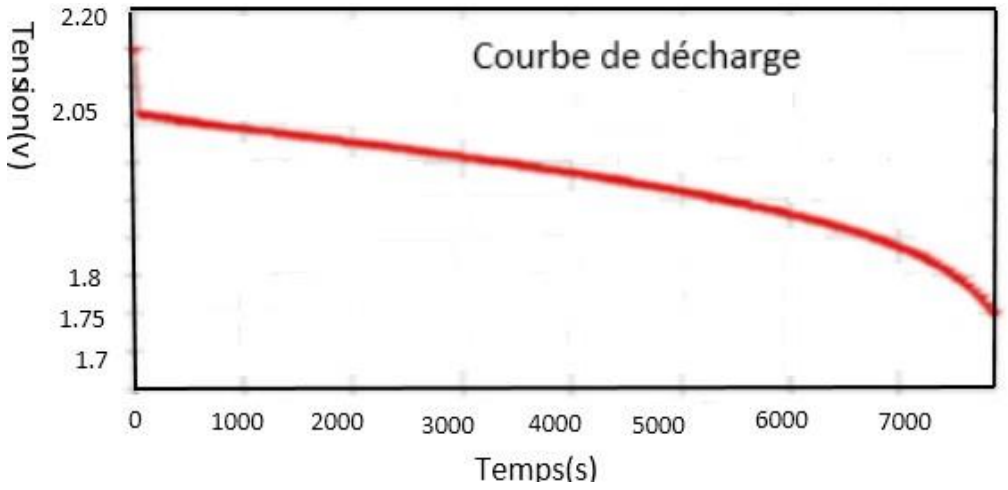


Figure II.16 : Évolution de la tension durant la décharge d'un accumulateur au plomb.

2.5 Modélisation du système de conversion

L'onduleur est un dispositif de conversion, il est important de connaître la relation liant la puissance à l'onduleur à celle entrante.

Cette caractéristique est représentée par la fonction [31]:

$\eta 0 = f(P_{ch})$ ou encore $\eta 0 = f$ (taux de charge).

La charge étant alimentée en courant alternatif, un onduleur est donc présent entre le bus continu et

la charge (voir Figure II.17). Il existe diverses équations pour définir le rendement d'un onduleur en fonction de la puissance délivrée.

L'onduleur est considéré comme un dispositif de transformation en énergie alternative, d'une énergie de type continu provenant soit du système de stockage, soit directement de champ PV. De tels dispositifs devraient délirer une tension alternative à fréquence déterminée c'est-à-dire le signal généré par ce dernier doit être le plus sinusoïdal possible. Ces onduleurs sont largement utilisés, mais les appareils existant ont l'inconvénient majeur de présenter des pertes, à vide ou à faible charge, très élevées, leur rendement n'est donc acceptable qu'à pleine charge.

L'onduleur monophasé est caractérisé par son rendement en fonction de la puissance fournie à l'utilisation. Le modèle de rendement se traduit par la relation empirique suivante :

$$\eta_{ond} = a.\ (1-\exp\ (b.\tau)) \qquad \text{(II-19)}$$

a et b sont des constantes (a =0,9559 ; b = -609164).

τ : Taux de charge, donnée par : $\tau = \frac{P_{sh}}{P_n}$

P_n : puissance nominale de l'onduleur.

P_{ch} : puissance à la sortie de l'onduleur.

La variation du rendement de l'onduleur en fonction de taux de charge est représentée sur la figure suivante:

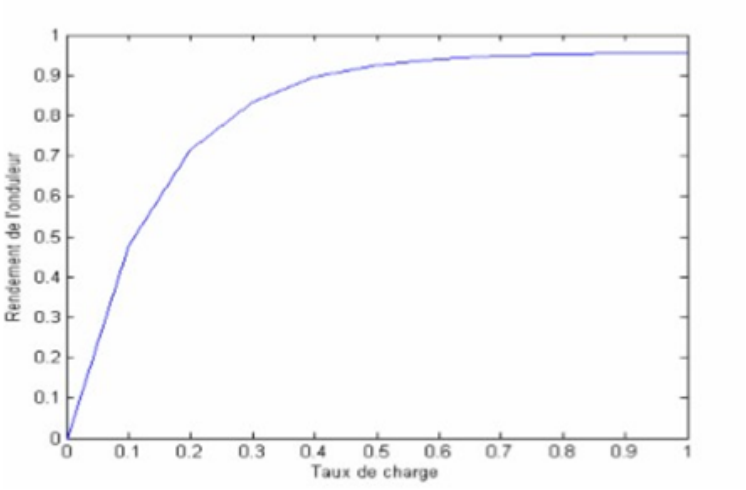


Figure II.17: Rendement de l'onduleur.

Nous verrons par la suite que le choix de la puissance nominale de l'onduleur en fonction de son application est primordial si l'on veut éviter des pertes énergétiques importantes $P_{pv}(t)$

2.6 Conclusion

En conclusion, la modélisation hybride d'un système photovoltaïque-éolien est une approche essentielle pour assurer une production d'énergie stable et efficace. En combinant ces deux sources d'énergie renouvelable, on peut maximiser la production totale d'électricité, optimiser l'utilisation des ressources naturelles et garantir une alimentation en énergie fiable. Cette modélisation à été élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, générateur éolienne, convertisseurs, stockage batteries) .De ce fait, la modélisation nous a autorisés à exprimer le fonctionnement du système analysé à travers des équations mathématiques pour évaluer les propriétés de chaque composant de notre installation.

Chapitre 3 :

Dimensionnement optimal par la méthode LPSP

3.1 Introduction

L'objectif principal de ce dimensionnement est de déterminer la configuration optimale de la centrale hybride éolienne, photovoltaïque et stockage pour satisfaire la puissance demandée par la charge.

Plusieurs méthodes de dimensionnement des systèmes d'énergies hybrides ont été réalisées par les chercheurs, celle que nous allons utilisée elle se base sur les deux principes technique et économique. Nous allons en premier lieu appliquer la méthode de la probabilité de perte d'énergie LPSP (Loss of Power Supply Probability).

Une fois que nous avons identifié les configurations qui répondent à la demande en énergie, nous utilisons une approche économique pour déterminer la configuration optimale. Cela implique de prendre en compte plusieurs facteurs tels que le coût initial des installations éoliennes et photovoltaïques, le coût des batteries, les coûts d'exploitation et d'entretien, ainsi que les coûts liés au stockage et à la gestion de l'énergie. L'objectif est de trouver la configuration qui offre le meilleur équilibre entre la production d'énergie renouvelable, la fiabilité de l'alimentation et les coûts associés. Cette approche permet de maximiser les avantages économiques tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles.

3.2 Définition du dimensionnement

Dans une installation hybride, le concepteur du système doit associer les sources d'énergie et les moyens de stockage de manière à satisfaire deux objectifs :

- Assurer une production suffisante pour couvrir l'ensemble de la consommation électrique des utilisateurs.
- Garantir le coût minimum de l'énergie consommée par les utilisateurs.

Cette phase de conception s'appelle le dimensionnement. Il s'agit notamment de déterminer quelle sera la puissance et la capacité des différents éléments. Cependant, à cause de la nature intermittente des sources renouvelables, le dimensionnement de l'installation s'avère difficile et doit, en toute rigueur, dépendre à la fois des caractéristiques météorologiques du lieu D'installation tout en intégrant le profil de consommation.

En effet, comment dimensionner chacun des éléments en termes de puissance et de capacité afin d'assurer une alimentation permanente de la charge, tout en obtenant une énergie au moindre coût ? Par exemple, sur un simple système équipé de batteries et de panneaux Photovoltaïques, que faut-il privilégier : une grande surface de panneaux photovoltaïques tout en minimisant la capacité des batteries ou l'inverse, au risque de faire subir des décharges très profondes qui endommageraient les batteries ? Répondre à ce problème d'optimisation, plusieurs solutions ont été proposées. Il s'agit de fournir au concepteur une solution permettant de dimensionner de manière optimale un système autonome de production d'électricité [32].

3.3 Dimensionnement des systèmes d'énergie hybrides

Pour concevoir des systèmes d'énergies hybrides, il est essentiel de sélectionner et dimensionner la combinaison optimale des sources d'énergie, des convertisseurs et du système de stockage, tout en mettant en place une stratégie de fonctionnement efficace. De plus, une étude de dimensionnement est nécessaire pour assurer une intégration réussie des énergies renouvelables sans compromettre la qualité de l'énergie fournie. Les logiciels de dimensionnement sont des outils indispensables pour analyser et comparer les différentes combinaisons possibles de sources d'énergie. Les principaux facteurs de dimensionnement incluent les conditions environnementales du site, le profil de charge, les préférences du client, les ressources financières et la disponibilité de la technologie et du support technique. Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement et de simulation pour les systèmes d'énergies hybrides

Homer Pro - Homer Energy, PV F-Chart - Logiciel F-Chart, pvPlanner – SolarGis, PVsyst - Pvsyst SA ,Somes ,tous ces logiciels ont pour d'optimiser les systèmes hybrides, mais les stratégies d'optimisation sont différentes. Une brève description de chaque outil est donnée ci-après

- ✓ ***HOMER PRO***

Développé par NREL (National Renewable Energy Laboratory) USA puis amélioré et distribué par Homer Energy est un logiciel d'optimisation de micro-réseau. HOMER signifie Hybrid Optimisation Model for Multiple Energy Resources et est fourni avec des outils de simulation, d'optimisation et d'analyse de sensibilité.

- ✓ ***PV F-CHART***

Développé par les facultés de l'Université du Wisconsin, PV F-Chart est un programme de conception d'analyse de systèmes photovoltaïques qui utilise les données de rayonnement solaire pour calculer la production d'énergie photovoltaïque sans tenir compte des variations causées par les modules PV, les onduleurs et d'autres variables. Ce programme est destiné à des fins académiques.

- ✓ ***PVPLANNER***

Ce logiciel provient du fournisseur de bases de données de ressources solaires SolarGis. Il s'agit d'un logiciel basé sur le Cloud qui fonctionne sur la plate-forme SaaS (logiciel en tant que service) et affirme que ses données sont très précises et offre une approche de validation systématique rigoureuse augmentant la fiabilité des données

- ✓ ***PVSYST***

Développé par le physicien suisse André Mermoud et l'ingénieur électricien Michel Villoz, ce logiciel est considéré comme un standard pour la conception et la simulation de systèmes PV dans le monde entier. Les développeurs affirment que ce logiciel est conçu pour être utilisé par des architectes, des ingénieurs, des chercheurs et des étudiants. [33]

- ✓ **SOMES**

Est un outil de simulation et d'optimisation des systèmes d'énergies renouvelables développé par l'Université d'Utrecht aux Pays-Bas. Il permet de comparer les coûts de différents systèmes et de trouver la solution optimale. Les composants disponibles incluent les panneaux solaires (PV), les éoliennes, les générateurs diesel, le réseau électrique, les batteries de stockage et différents types de convertisseurs. La simulation se fait sur une base horaire. Le système optimal est déterminé en comparant les coûts des différents systèmes, dans les limites définies par l'utilisateur. C'est un outil très utile pour développer des solutions énergétiques durables

3.4 Dimensionnement du système

L'étude de dimensionnement des installations solaires photovoltaïques est en effet cruciale pour garantir une performance optimale tout en minimisant les coûts. La considération des deux critères principaux que sont le gisement solaire et la demande énergétique est fondamentale pour concevoir un système efficace et économiquement viable.

Le processus de dimensionnement consiste à trouver le juste équilibre entre la production d'énergie solaire et la consommation d'énergie, tout en tenant compte des variations dans le temps. Il s'agit de déterminer le nombre optimal de modules photovoltaïques nécessaires pour répondre à la demande énergétique de la charge à tout moment, ainsi que la capacité de stockage de la batterie pour assurer une alimentation stable en cas d'absence de lumière solaire.

La méthode de dimensionnement optimal LPSP (Loss of Power Supply Probability) est largement utilisée dans ce domaine. Elle se base sur la probabilité de perte d'énergie pour optimiser la puissance crête du générateur photovoltaïque et la capacité de stockage en fonction de l'éclairement solaire disponible sur le site et du nombre de jours d'autonomie souhaité. En utilisant cette approche, il est possible de minimiser les risques de coupure d'alimentation tout en optimisant l'investissement en équipement solaire et de stockage.

En résumé, le dimensionnement d'une installation solaire photovoltaïque nécessite une analyse approfondie des conditions locales, de la demande énergétique et des objectifs d'autonomie, afin de concevoir un système fiable, efficace et économiquement rentable.

3.5 Description de la méthode LPSP

Un système “équilibre“, la quantité d’énergie fournie par les modules solaires doit au moins compenser la quantité d’énergie, ceci en fonction du lieu de l’installation, de la saison, et des conditions particuliers de consommation et d’utilisation. Dimensionner un système PV revient à

Déterminer l'ensemble des éléments de la chaîne PV en fonction des sollicitations telles que l'ensoleillement et le profil de charge. Il n'y a pas d'échelle fixe entre la consommation et la taille du générateur. Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système PV : par la fonction utilisabilité horaire, par la probabilité de pertes d'énergie, et par les méthodes itératives…etc.

Dans notre étude, on utilise la méthode de probabilité de pertes d'énergie. La notion de cette méthode (LPSP) peut être définie par la fraction mensuelle de la charge moyenne sur une longue période qui n'est couvert pas par le système photovoltaïque.

La méthode de dimensionnement présentée, consiste à déterminer le nombre optimal des batteries et des modules PV selon deux critères d'optimisation à savoir: la fiabilité, qui est basée sur le concept de la probabilité de perte d'énergie (Loss of Power Supply Probability _ 'LPSP') et sur le coût du système. La 'LPSP' est définie comme étant la fraction de l'énergie déficitaire sur celle demandée par la charge. Elle exprime le taux de non-satisfaction de la charge. En terme d'état de charge des batteries, la 'LPSP' est définie par :

$$LPSP = Pr\{C_{Bat}(t) \leq C_{Bat,\,min} \text{ pour } t \leq T\} \qquad \text{(III-1)}$$

C'est-à-dire, la probabilité pour que l'état de charge, à tout instant t, soit inférieur ou égal au seuil minimal de l'énergie disponible dans la batterie $C_{bat,min}$. C_B (t) est l'énergie stockée dans la batterie à n'importe quel instant t, exprimée en [Wh].

$$C_{bat}(Wh) = C_{bat} \cdot V_{bat} \qquad \text{(III-2)}$$

C_{bat}: La capacité nominale de la batterie

V_{bat} : La tension nominale de la batterie.

L'énergie produite conjointement par l'aérogénérateur et le générateur photovoltaïque en une heure, notée EG (t), peut être exprimée par la relation suivante [34] :

$$EG(t) = NpvEpv + Ew(t) \qquad \text{(III-3)}$$

Avec: Ew (t) qui est l'énergie produite par l'aérogénérateur, Epv (t) l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et Npv le nombre de modules photovoltaïques.

- ✓ **Premier scénario**

Si l'énergie produite par les deux sources dépasse l'énergie demandée par la charge, la batterie se charge en considérant son rendement de charge ηB,ch:

$$Cb(t) = Cb(t-1) + \left(EG(t) - \frac{PL(t)}{\eta ond}\right)\eta_{B,ch} \qquad \text{(III-4)}$$

- ✓ **Deuxième scénario**

Quand l'énergie demandée par la charge est supérieure à l'énergie produite, la batterie se décharge pour combler le déficit, dans ce cas précis, l'énergie stockée dans la batterie peut être exprimée par la relation suivante:

$$Cb(t)=Cb\ (t-1) + (\frac{PL(t)}{\eta ond}\text{-}EG(t)) \quad \text{(III-5)}$$

Avec: ηond le rendement de l'onduleur; le rendement de charge de la batterie, Cb (t) l'énergie stockée dans la batterie à une heure t, Cb (t − 1) l'énergie stockée dans la batterie à l'heure précédente, P_L (t) l'énergie demandée par la charge à une heure t.

Quand l'énergie stockée dans le banc de batteries et celle produite conjointement par les deux sources est insuffisante pour satisfaire la demande pour une heure t, ce déficit est appelé perte d'énergie (Loss of Power Supply _ 'LPS'), il est exprimé par:[35] [36]

$$\mathbf{LPS\ (t)} = P_L\ (t) - (E_G + \mathbf{C_{Bat}\ (t-1)} - \mathbf{C_{Bat,min}}\ (t)).\ \boldsymbol{\eta_{ond}} \quad \text{(III-6)}$$

Avec

E_L (t) : Energie totale demandée

η_{ond} : Rendement de l'onduleur exprimé en pourcentage

C_{Bat} : Capacité nominale de la batterie en Ah

La probabilité de perte d'énergie (LPSP) pour une période d'analyse T, est le rapport de la somme de toutes les valeurs de perte d'énergie (LPS) pour la même période sur l'énergie totale demandée. La probabilité de perte d'énergie LPSP est définie par la relation suivante [35] [36]:

$$LPSP=\frac{\sum_{t=1}^{T} LPS(t)}{\sum_{t=1}^{T} PL(t)} \quad \text{(III-7)}$$

La méthode de dimensionnement consiste à déterminer le nombre optimal d'accessoires qui correspond à un bon fonctionnement du système avec un coût minimal.

3.6 Avantages de la méthode LPSP

Les avantages d'un système hybride photovoltaïque/éolien autonome basé sur le concept LPSP sont nombreux :

1. Durabilité environnementale : Les systèmes hybrides utilisant à la fois l'énergie solaire et éolienne sont respectueux de l'environnement, car ils réduisent la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de gaz à effet de serre.
2. Fiabilité de l'alimentation électrique : En combinant les deux sources d'énergie, le système hybride est plus fiable et stable. Si l'une des sources d'énergie n'est pas disponible (par

exemple, en cas de mauvais temps), l'autre source peut prendre le relais pour fournir de l'électricité.

3. Réduction des coûts énergétiques : Les systèmes hybrides permettent de réduire les coûts énergétiques à long terme. En utilisant l'énergie solaire et éolienne, vous pouvez réduire votre dépendance à l'électricité du réseau et potentiellement économiser sur vos factures d'électricité.
4. Flexibilité et adaptation : Les systèmes hybrides peuvent être adaptés en fonction des besoins spécifiques de votre charge. Vous pouvez ajuster la taille des panneaux solaires, des éoliennes et de la batterie pour répondre à la demande en énergie.
5. Autonomie énergétique : Avec un système hybride, vous pouvez devenir plus indépendant sur le plan énergétique. Vous n'êtes pas entièrement dépendant du réseau électrique et vous pouvez générer votre propre électricité de manière autonome.

Ces avantages font des systèmes hybrides photovoltaïques/éoliens autonomes basés sur le concept LPSP une solution attrayante pour ceux qui cherchent à utiliser des sources d'énergie renouvelables et à réduire leur empreinte carbone tout en ayant une alimentation électrique fiable.

3.7 Applications de la LPSP à l'installation PV

Nous appliquons dans ce qui suit la méthode de dimensionnement optimal LPSP à notre profil de charge, ce qui nous permettra alors de présenter nos résultats de simulations que nous avons obtenus par le biais de programme que nous avons effectué sous environnement Matlab basé sur la méthode de dimensionnement LPSP.

La première étape, consiste à définir avec précision les besoins énergétiques, car cela influence directement la taille des composants du système. Il est essentiel de ne pas sous-estimer ni surestimer la consommation électrique, car cela peut entraîner des résultats inappropriés.

Ensuite, vous passez à l'estimation du nombre de modules photovoltaïques nécessaires pour couvrir ces besoins énergétiques. Cela implique de calculer l'énergie quotidienne que les modules doivent produire, en tenant compte de l'ensoleillement de la région où se trouve l'installation.

Une fois que vous avez déterminé la quantité d'électricité que vous pouvez produire, vous pouvez ensuite dimensionner le stockage d'énergie, généralement des batteries, en fonction de la périodicité de votre consommation. Ceci garantit que l'électricité est disponible même lorsque le soleil ne brille pas.

Le dimensionnement du régulateur de charge vient ensuite, qui contrôle la charge des batteries et protège le système contre les surcharges et les décharges excessives.

Si nécessaire, vous devrez également choisir un onduleur pour convertir le courant continu produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif, si ma charge fonctionne en mode AC. Toutefois, si certaines charges fonctionnent déjà sur alimentation CC, l'alimentation de commutation

peut ne pas être nécessaire.

En résumé, le processus de dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome implique une analyse minutieuse des besoins énergétiques, du potentiel solaire de la région, ainsi que du choix des composants appropriés pour assurer un fonctionnement efficace et fiable du système.

3.8 Méthodologie adoptée

1. Choix d'un profil de consommation électrique représentatif du site.
2. Dimensionnement du système à l'aide de la méthode LPSP pour optimiser les composants.
3. Calcul du nombre de modules solaires et de la capacité de stockage des batteries.
4. Interprétation des résultats pour s'assurer que les composants sélectionnés répondent efficacement aux besoins énergétiques du site.

3.9 Dimensionnement du générateur photovoltaique

Nous utiliserons la méthode LPSP pour obtenir les résultats de simulation que nous avons obtenus grâce à notre programme. Vous pouvez consulter l'organigramme des calculs dans la figure qui suit.

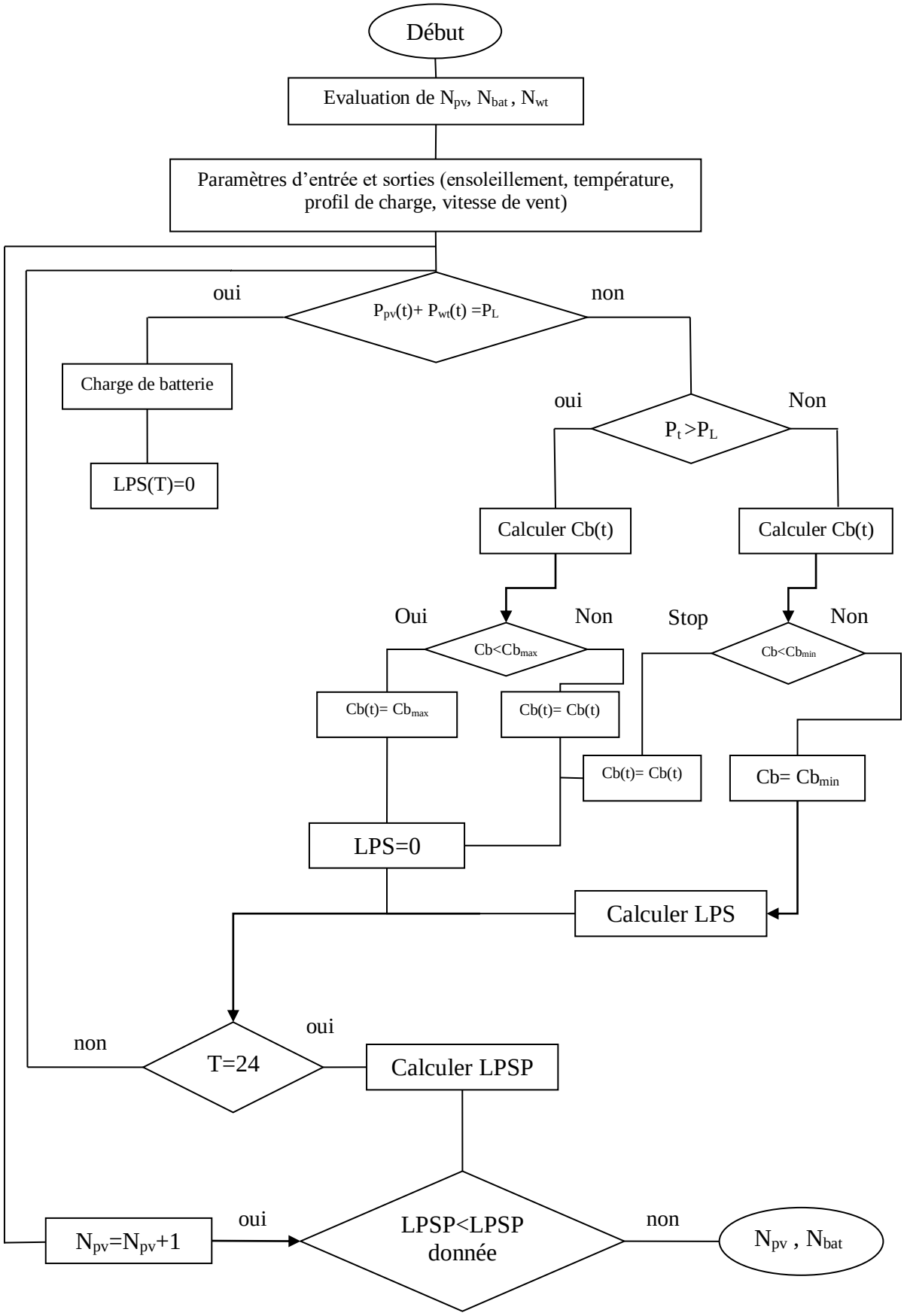


Figure III-1 : Algorithme graphique de la LPSP

3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit la méthode de calcul pour optimiser le dimensionnement des systèmes hybrides autonomes photovoltaïques/éoliens en se basant sur le concept LPSP. L'objectif principal de cette approche est de déterminer la configuration optimale du système hybride éolien et photovoltaïque afin de répondre à la demande énergétique de la charge

Chapitre 4 :

Résultats de simulation et discussion

4.1 Introduction

Les chapitres précédents ont présenté une analyse théorique des composants d'un système hybride Photovoltaïque-éolien. Nous allons concentrons dans ce chapitre sur le dimensionnement concret de ce système pour électrifier une région isolée, la province de Tamanrasset, dans le sud algérien tout en exploitant les énergies renouvelables appropriées à ce climat spécifique. Pour faire, nous avons utilisé un modèle de simulation avec Matlab qui intègre des données telles que le profil de charge, le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température, ainsi que les coûts initiaux et la durée de vie des composants. Les phases de ce processus incluent l'évaluation des données météorologiques, le dimensionnement précis des composants, et la simulation pour évaluer les performances du système. Les résultats sont ensuite analysés pour garantir une alimentation électrique efficace pour cette zone non reliée au réseau électrique traditionnel.

4.2 Présentation du site et ressources météorologiques

4.2.1 L'emplacement du système hybride

Le site sélectionné pour cette étude est un village rural saharien isolé situé dans la commune de In Ambule dans la wilaya de Tamanrasset .L'énergie solaire photovoltaïque combinée à un générateur éolien en complément pourrait être une solution durable et plus adaptée pour fournir une énergie propre et non polluante.

Tamanrasset est une wilaya algérienne elle est la capitale des Touaregs, située à 1900 kilomètres au Sud d'Alger, et il couvre une superficie totale de 37713 kilomètres carrés, et sa population est estimée à 92635 personnes, il comprend également 6 communes et 7 districts

- Elle est limitée par :
  - Au sud : la wilaya d'Ain Guezzam et pays de Niger
  - Au nord : la wilaya d'Ain Salah
  - A l'Est : la wilaya d'Illizi et wilaya de Djanet
  - A l'Ouest : la wilaya de L'Adrar et wilaya de Bordj Badji Mokhtar
- Coordonnées du site :
  - Latitude : 22.7869
  - Longitude : 5.52722
  - Altitude : 1400m

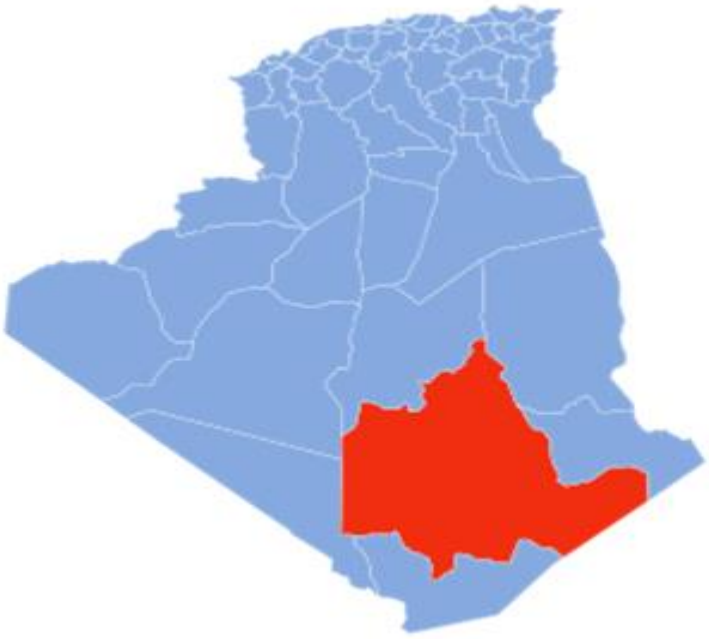


Figure IV.1: Localisation géographique du Tamanrasset

Le climat de Tamanrasset

Tamanrasset possède un climat désertique chaud, et la température est large entre le jour et la nuit et entre l'hiver et l'été, entre 16 et 26 degrés en hiver est entre 19 et 40 degrés en été, et la vitesse du vent est 15 à 36 km par heure.

Ain Amguel

Ain Amguel est l'une des municipalités de la wilaya de Tamanrasset, relevant de la daïra de Tamanrasset. La ville d'Ain Amguel est située à 130km de la capital de la wilaya de Tamanrasset .La municipalité est bordée au nord par Ain Salah, au sud par la ville de Tamanrasset, à l'est par Idles, Tazrouk,et à l'ouest par la municipalité d'Iblessa.

Cette municipalité comprend sept quartiers :Semdaka,Iferg,Douka,Karmouin (la capitale de la municipalité) ,El Hafra,Bouqlan,Taghramt,et Ennachabi.Elle abrite deux communes :Iferg 02 et Arak. En plus de plusieurs agglomérations dispersées comme Aggaris, Imidir, Ahouhagh, Assilal, Ahnet, Abedinezzi, Moulay Lhassan, Aghchoum, et In Ekhem. Nous avons effectué des recherches et des études sur la commune d'Arak concernant le profil de charge, la vitesse de vent…

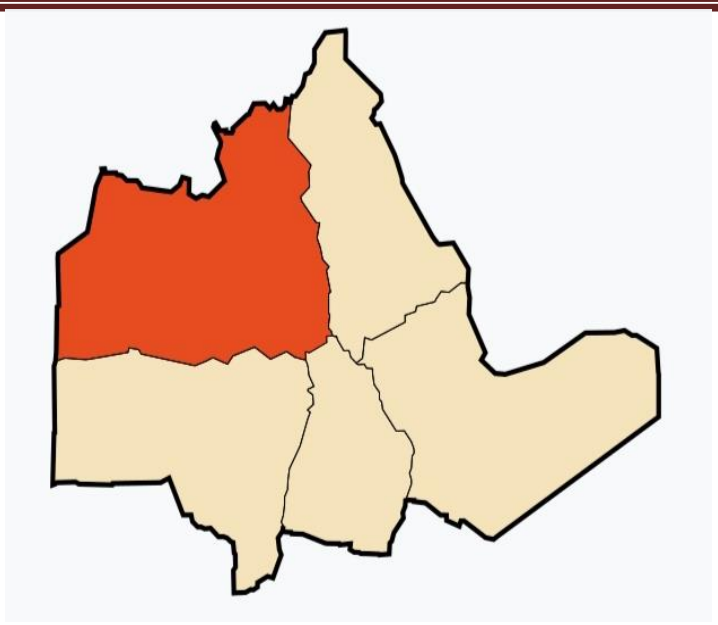


Figure IV.2 : Localisation géographique d'Ain Amguel (Tamanrasset)

4.2.2 Les données métrologiques

a. Irradiation

L'évaluation annuelle de l'ensoleillement du site pour chaque mois.

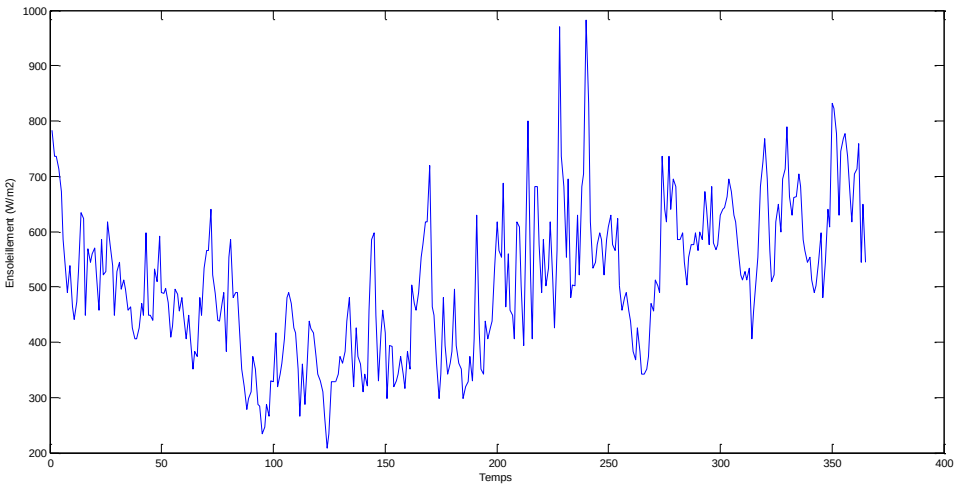


Figure IV.3: Evaluation de l'ensoleillement en (watt/m²)

Effectivement, dans la figure IV.3 nous pouvons observer une variation des valeurs d'irradiation de 210 et 790watt/m^2 pour (janvier jusqu'à avril), et varie encore plus importante de 300 et 995watt/m^2 pour (mai jusqu'à aout), et entre 550et 600watt/m^2 pour les dernier mois (septembre jusqu'à décembre).

b. Température

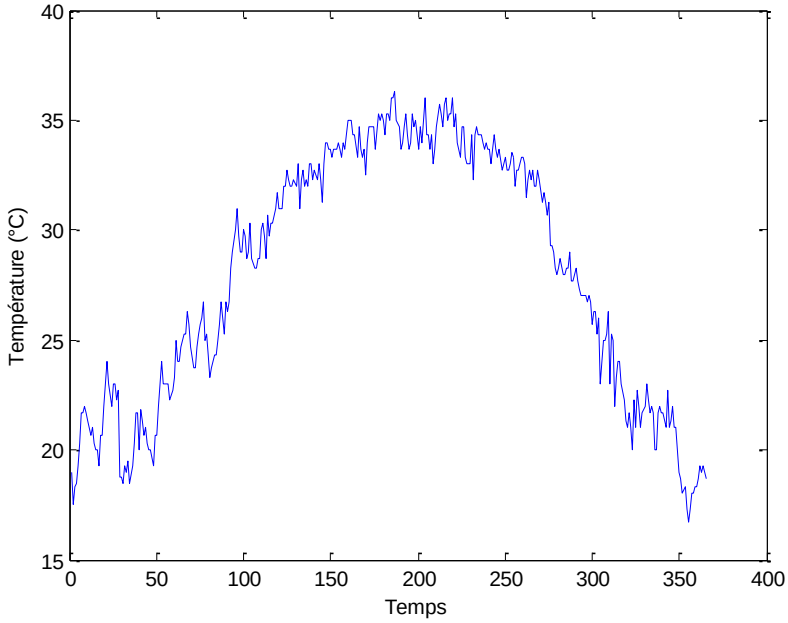


Figure IV.4 : Evaluation de la température en (C°)

Dans la figure IV.4 on remarque que la température mensuelle connait des variations entre le jour et la nuit, on a constaté une augmentation au fil des mois (janvier jusqu'à juillet) vont de 19°C à 35°C, et diminution du rayonnement solaire pour (Aout jusqu'à septembre) de 35°C à 17°C.

C. vitesse de vent

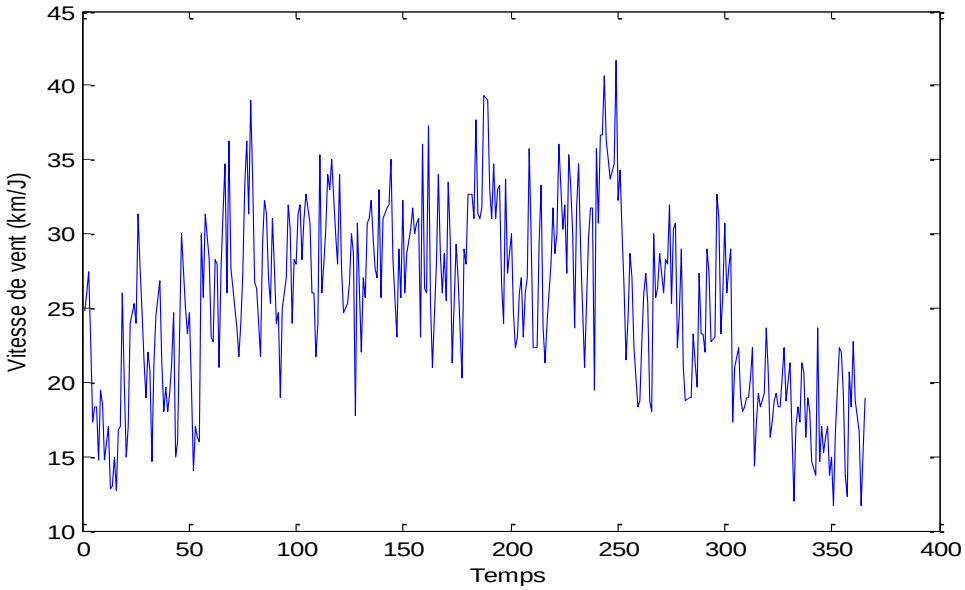


Figure IV.5 : Evaluation de vitesse de vent en (km/j)

Dans la figure IV.5 on remarque que la vitesse du vent commence à augmenter à partir de la vitesse de démarrage appelée « cut-in » (début d'année, qui correspond au mois de janvier), elle peut connaitre des fluctuations, mais elle atteint une valeur maximale qui est la plus élevée (vitesse nominale) de l'année, et qui vaut 42km/j (de 248 à 250 jours). Ainsi sa valeur minimale est de 12

Km/j qui correspondant au mois de décembre.

4.2.3. Le profil de charge

Tableau IV.1: Estimation des besoins énergétiques journaliers d'une journée Hivernale et estivale

Type de charge	**Puissance (W)**	**Durée utilisation(h)**	**Consommation électrique(Wh/j)**
Eclairage(L)	11-25	5	550/330
Téléviseur TV tube Cathodique	80-100	4	320/400
Réfrigérateur.(R) "250L"	150-350	24	8400
Radio	40-150	2	80
Moteur de pompe	1500	3	3000/9000
Machine à laver(M.L.V)	2000-2200	1cycle/j	0.9Kwh/cycle=900
Four Electrique(F.E)	750-1500	1h/j	750
Fer à repasser	750-1100	5h semaine	540
Sèche cheveux	300-600	30min/j	300
Machine à coudre	70-100	1h/j	100
Machine à traire	750	2/j	1500
Climatiseur (Clim)	1200	4/j	4800
Ventilateur	45	2/j	90
Le fer(Fer)	300-900	2/j	600
Les Lampes(L)	1200	12	14400
Radiateur(Rad)	1000-1200	4	4000/4800
Total journalière			**39.40/46.80 Kwh/j**

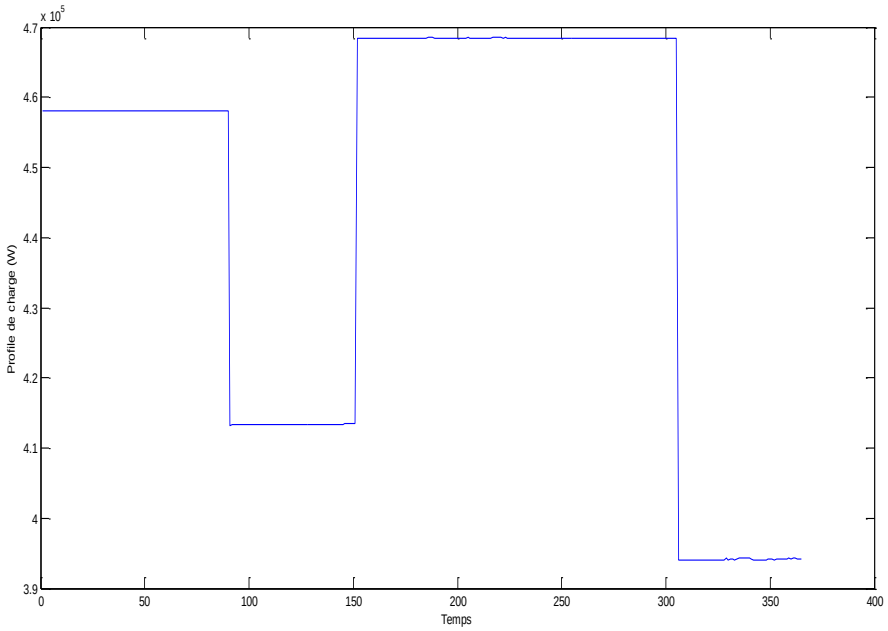


Figure IV.6 : Evaluation du profil de charge en (watt)

À travers le graphique indiqué ci-dessus (figure IV.6), nous remarquons l'enregistrement d'une valeur maximale de $4{,}69\times10^5$ watts (du jour 155 au jour 312 de l'année), correspondant aux mois de (juin, juillet, août, septembre et octobre). Et la valeur minimale enregistrée est de $3{,}93\times10^5$ watts du jour 312 à la fin de l'année, correspondant aux mois de (novembre et décembre).

Tableau IV.2 : Symboles pour tous les appareils électriques.

Equipment Electrique	Symbole	Equipment Electrique	Symbole
Réfrigérateur	R	Machine à laves	M.LV
Télévision	TV	Four Electrique	F.E
Les lampes	L	Radiateur	Rad
Le fer	Fer	Ventilateur	Vent
Climatiseur	Clim		

4.3. Système d'étude

Dans la configuration du système hybride photovoltaïque/éolien choisi pour notre étude, nous avons la figure (Figure IV.7) qui présente cela. Ici, le générateur éolien est connecté au bus de courant alternatif (AC), tandis que l'installation photovoltaïque et la batterie sont liées à un autre bus de courant continu (CC). Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel qui peut fonctionner soit en tant que redresseur, lorsque le générateur éolien couvre la consommation électrique et participe au chargement de la batterie, soit en tant qu'onduleur, lorsque la charge est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. De cette manière, la charge

peut être alimentée par les deux bus simultanément.

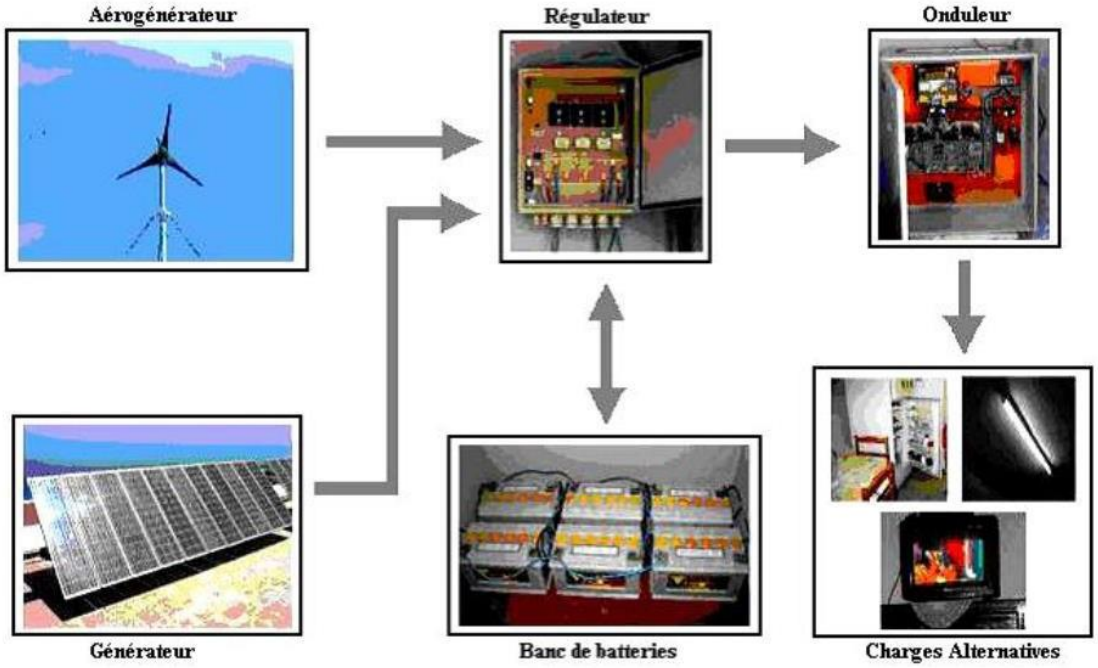


Figure IV.7 : Schéma synoptique du système hybride étudié

Ce système est équipé de batteries qui permettent de stocker l'énergie. De plus, des onduleurs CC/AC sont nécessaires pour convertir le courant continu en courant alternatif. Pour déterminer le dimensionnement optimal en KW de notre système (ppv, Péolien ou Pwt, Pconv, Nombre de batterie) afin de satisfaire la demande de charge, nous appliquons la méthode LPSP sur cette architecture de base. [37]

4.4 Les différents éléments du système

Avant de commencer à dimensionner notre système, nous allons d'abord présenter ses principaux éléments.

4.4.1 Générateur photovoltaïque

La figure IV.8 présentée ci-dessous représente évaluation de puissance photovoltaique en fonction des jours de l'année. On remarque une valeur maximale de la puissance qui vaut $5.4*10^5$ (watt). Ainsi la valeur minimale enregistrée dans ce cas est de $1.1*10^5$ (watt).

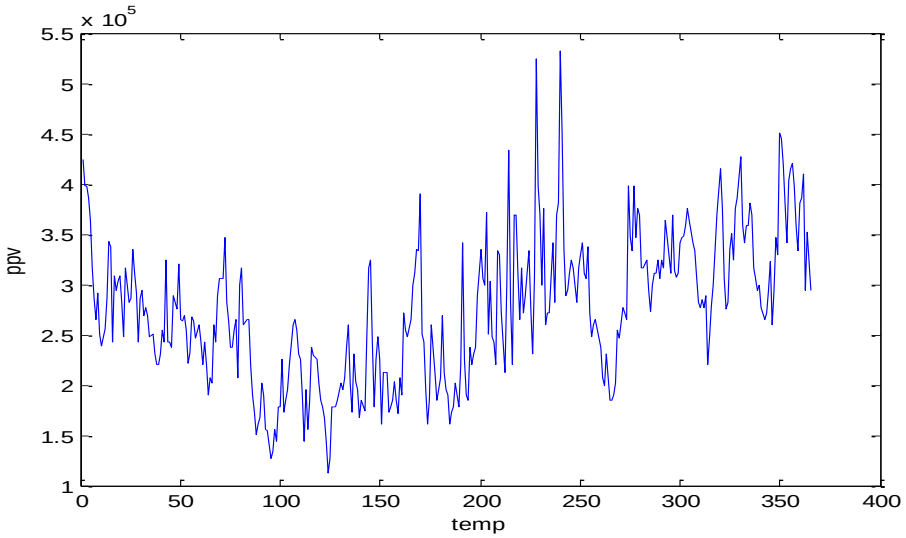


Figure IV.8 : Evaluation de puissance photovoltaïque (watt) en fonction de t(j).

4.4.2 Générateur éolien

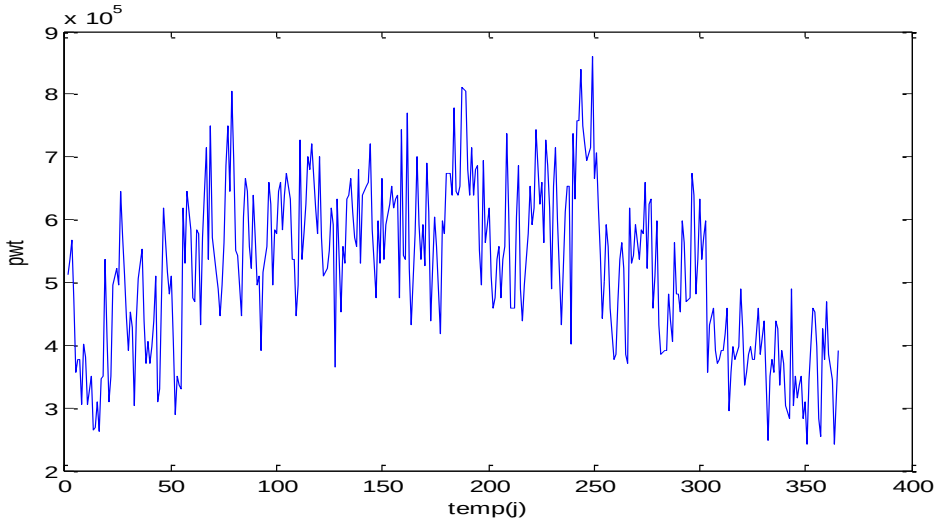


Figure IV.9 : Evaluation de puissance éolienne (watt) en fonction de t(j).

On constate que la puissance éolienne dans notre cas présenté dans la figure IV.9 atteint un seuil de $8.6*10^5$ watt pour 250 jours. Quant à la valeur minimale est de $2.3*10^5$ watt et qui correspond au mois de décembre.

4.4.3 Les batteries

La courbe ci-dessus (figure IV.10) présente l'évaluation de la puissance de batterie en fonction des jours de l'année on remarque une valeur maximale de la puissance de la batterie qui est de $9.4*10^5$ (watt) et qui correspond au mois de mai. Concernant la valeur minimale enregistrée dans ce cas elle est de $2.4*10^5$ (watt) qui correspond au mois d'octobre.

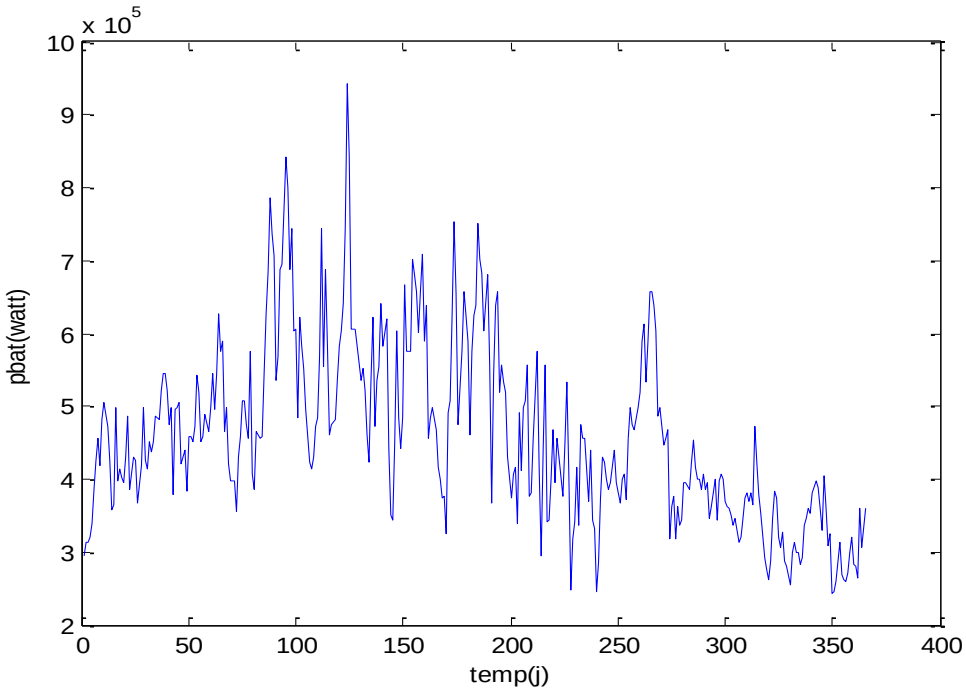


Figure IV.10 : Evaluation de puissance de batterie (watt) en fonction du temps (j).

4.4.4 Régulateur de charge

Le régulateur de charge est responsable de diverses fonctions de protection, il empêche la décharge de la batterie à travers le panneau solaire ainsi que sa surcharge profonde. Il réagit en cas de court-circuit du côté de la charge.

De plus, le régulateur contrôle le transfert d'énergie entre le générateur photovoltaïque, la batterie et la charge.

4.5 Optimisation du système

Effectivement, lors de l'optimisation d'une installation photovoltaïque, il est crucial de déterminer le nombre de modules photovoltaïques nécessaires pour constituer le générateur photovoltaïque, ainsi que la capacité de charge des batteries.

4.5.1 Optimisation du banc des batteries

La capacité des batteries pour une période de temps est donnée par l'équation suivante :

La capacité de la batterie (en Watt heure) :

$$C_{bat}\,[WH]=\frac{EL.AUT[WH]}{\eta_{Bat}.F_{dech}.DOD} \qquad \text{(IV-1)}$$

La capacité en Ah est donnée par la relation suivante :

$$C_{bat}\,[AH]=\frac{Cbat[WH]}{Vb} \qquad \text{(IV-2)}$$

Cbat: Capacité nominale de la batterie (Wh ou Ah)

ET: Energie totale consommée /jour (Wh/Jour)

AUT: Autonomie du système (Jours)

DOD : Profondeur de décharge de la batterie

VBat : Tension nominale de la batterie (V) Pour notre système, nous avons

Vbat= 12 V, AUT= 365 jours, DOD = 11.22; EL = 455.663KWh/j (hiver)

donc :

Cbat= 74209 Wh Cbat =6184.08 Ah

4.6 Résultats de l'optimisation

Tableau IV.3 : Nombre des panneaux PV en fonction de LPSP.

LPSP	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08
Nombre des panneaux PV	8	9	12	15	25
Nombre des batteries	13	14	35	40	45
Nombre d'éoliennes	95	96	100	150	170

Les résultats de simulation, montre que le couple optimal est de 12 modules PV et de 35 batteries.

On remarque que la relation entre la LPSP et le nombre de panneaux PV, éoliennes, batteries ainsi que la puissance est une relation pré pondérale.

Le tableau ci après représente les résultats des énergies pour une LPSP qui vaut 0.04.

Tableau IV.4 : les résultats des énergies.

Puissance photovoltaïque	$6.3798*10^{6}$W
Puissance nominale de l'éolienne	$8.6002*10^{7}$W
Capacité des batteries	$1.2284*10^{11}$W
Energie totale photovoltaïque	$1.1999*10^{9}$Wh/an
Energie totale éolienne	$1.9083*10^{10}$Wh/an

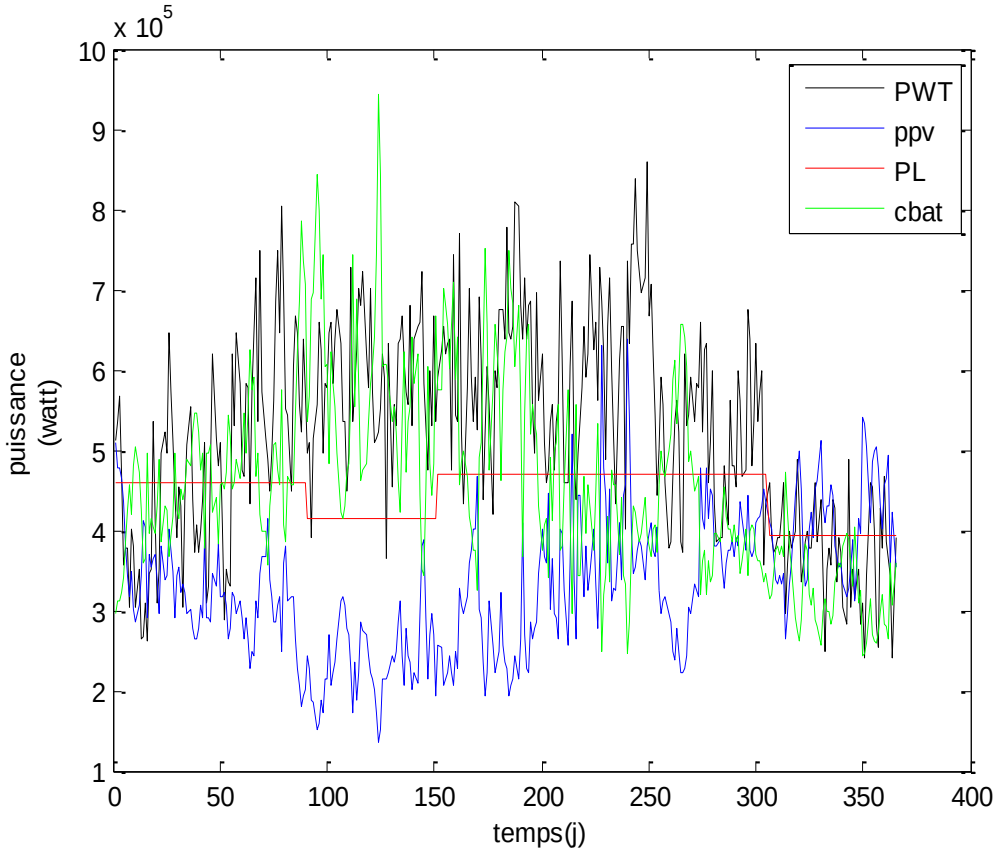


Figure IV. 11: Evaluation de la puissance photovoltaique, éolienne et batterie (watt) en fonction du temps (j).

Apres avoir élaboré les programmes et effectué les calculs, on a constaté que les meilleures valeurs qui correspondent à la meilleure optimisation sont définies dans le tableau IV.3, pour une LPSP de 0.04 et un nombre de panneaux PV, de batteries et d'éoliennes ayant des valeurs de 12, 35,100 respectivement.

4.7. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé une approche de dimensionnement optimal du générateur photovoltaïque-éolien et du stockage de batteries dans un système hybride de production d'électricité (éolien - photovoltaïque) entièrement autonome, en tenant compte d'une charge spécifique et d'une probabilité définie de perte d'énergie. Après avoir défini un schéma de consommation similaire à celui observé habituellement dans les zones isolées, un ensemble optimal de batteries et de panneaux photovoltaïques (Npv, Nb) a été déterminé suite au calcul de la puissance générée par l'éolienne et par le générateur photovoltaïque pour une analyse sur une année complète au site de Tamanrasset.

D'après les résultats de la simulation, en considérant un profil de charge spécifique, un rendement de batterie de 85% et un rendement de convertisseur de 95%, les couples optimaux (Module pv, éolienne, Batterie,) pour répondre aux besoins de la charge sont (12, 100,35).

La détermination optimale des batteries et des modules photovoltaïques dépend effectivement du site choisi, du profil de charge ainsi que des rendements des composants du système hybride photovoltaïque éolien. Il est crucial de prendre en compte tous ces facteurs pour concevoir un système efficace et adapté aux besoins spécifiques.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce mémoire se concentre sur la production d'électricité à partir d'un système hybride (photovoltaïque-éolien) avec un système de stockage autonome.

Il contribue à l'étude des sources d'energie solaire et éolienne, mettant en lumière leur complémentarité et la possibilité d'adaptation entre ces deux sources et la charge.

La modélisation hybride d'un système photovoltaïque-éolien est une approche cruciale pour assurer l'efficacité et la stabilité de production d'énergie. Il est possible de maximiser la production totale d'électricité si on combine la source d'energie solaire et éolienne ainsi qu'on optimise l'utilisation des ressources naturelles. La modélisation dans cette étude nous a autorisées à montrer le fonctionnement du système analysé en utilisant des équations mathématiques.

L'objectif était d'assurer une fiabilité élevée en dimensionnant de manière optimale les systèmes hybride (photovoltaïque-éolien) pour une charge spécifique, tout en minimisant les couts. Apres avoir calculé la puissance produite par l'aérogénérateur et le générateur photovoltaïque sur une année a Tamanrasset.

Nous avons introduit la méthode de calcul pour optimiser le dimensionnement des systèmes hybrides autonomes photovoltaïques/éoliens en se basant sur le concept LPSP. L'objectif de cette méthode est d'optimiser le système hybride éolien et photovoltaïque pour répondre à la demande énergétique de la charge.

Nous avons tenu compte d'une charge spécifique et d'une probabilité définie de perte d'énergie. Nous avons déterminé ensemble de batteries et de panneaux photovoltaïques (Npv, Nb) après le calcul de la puissance générée par l'éolienne et par le générateur photovoltaïque pour une analyse sur une année complète.

Les résultats de la simulation ont montré les meilleures performances des systèmes pour répondre aux besoins de la charge, pour un profil de charge spécifique, un rendement de batterie de 85% et un rendement de convertisseur de 95%, ainsi que les couples optimaux (Module pv, éolienne, Batterie,) ayant des valeurs (12, 100,35) respectivement.

L'optimisation des batteries et des modules photovoltaïques dépend du site, du profil de charge et des rendements des composants du système hybride photovoltaïque-éolien. Il est important de considérer tous les facteurs cités pour concevoir un système efficace et adapté aux besoins spécifique

Références bibliographiques

[1] S.Petibon, « nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, » thèse de doctorat, université de Toulouse, France, janvier, 2009.

[2] I.Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, », Thèse de doctorat, Université du havre, France Décembre, 2005**.**

[3] K.Ghoul, « Modélisation et commande d'un système multi-sources (Photovoltaique-éolienne) », Mémoire de master, Université Larbi Tebessi-Tébessa, Algerie ,2022.

[4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire.

[5] K. AMOKRANE, « Etude et Performances des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable ». Mémoire Magister, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2008.

[6] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolta%C3%AFque.

[7] https://www.prime-energy-technics.ch/actualites/histoire-du-photovoltaique.

[8] https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique.

[9] https://sti2d.ecolelamache.org/documents/cellules_photo.pdf.

[10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Photovolta%C3%AFque_raccord%C3%A9_au_r%C3%A9seau.

[11] https://www.power-africa.com/systemes-denergies-solaires-photovoltaiques-autonomes-et-hybrides/

[12] *Use of Appliance in Stand-Alone PV Power supply Systems: problèmes and solutions* [archive] », iea-pvps.org (consulté le 21 juillet 2011).

[13] https://www.dsnsolar.com/info/advantages-and-disadvantages-of-a-solar-tracke-36655330.html.

[14] https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne.

[**15]** FERRAH Billel : « Etude d'un système Hybride (photovoltaïque_ éolien) », Thèse de Master, université Badji Mokhtar Annaba, 2015.

[16] https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/quels-sont-les-differents-types-d-eoliennes.

[17] http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/comp/index.htm: Danish Wind Industry Association, 2010.

[18] M. Dahbi : « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », Mémoire de magister, option physique énergétique, 2007.

[19] https://www.univ-sba.dz/ft/images/Polycopie/POLYCOPIE-BENAMARA.pdf.

[20] https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_de_l%27%C3%A9nergie.

[21] ABDOUNE A, KARAOUI Ridha : Modélisation et optimisation du système Photovoltaïque, mémoire de master, UNIVERSITE DE M'SILA 2012.

[22] http://fr.enf.solar.com/PV/Panel_datasheet/Crystalline/32256**,**2020.

[23] http://Datasheet-Inverter-RS-Smart-Solar-FR.pdf,2018

[24] R. Miguel, 'Small Wind/Photovoltaic Hybrid Renewable Energy System Optimisation', Thèse de master, Université de Puerto Rico, 2008.

[25]AIDOUN Anouar et BOURAHLA Abdel Karim : «Optimisation d'un système hybride photovoltaïque/éolienne pour l'électrification d'un site isolé », Thèse de Master, université YAHIA FARES DE MEDEA, 2021.

[26] A. KAABECHE, M. BELHAMEL, R. IBTIOUEN, S. MOUSSA et M. R.BENHADDADI, « Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3 199 – 209, 2006.

[27] KRAIMIA Adel : « Etude d'un système hybride (Eolien-Photovoltaïque) », thèse de Master, université Badji Mokhtar Annaba, 2020.

[28]D.REKIOUA, Z.ROUMILA et T.REKIOUA, « Etude d'une centrale hybride photo _éolien_diesel », Revue des Energies Renouvelables, Vol.11 N°4 623_633,2008.

[29]F.Chekired, « Etude et implémentation d'une Commande MPPT neuro_Floue sur FPGA » Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[30] M. Rabah ROUAS : «Etude d'un système Hybride éolien-photovoltaïque », thèse de doctorat, université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2018.

[31]Mr. HADJ AMEUR Mohammed el Mahdi et Mr. BRAHIM BELHAOUARI Merwan: «Etude de performances d'une installation photovoltaïque autonome hybride pour l'électrification d'un site rural au sud d'Algérie», Thèse de Master, université YAHIA FARES DE MEDEA, 2020.

[32] ZIDANE Nourredine : « Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production D'Energies Renouvelables », Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF1, 2014.

[33]https://www.dsnsolar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-35229172.html.

[34] F Benyarou « conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïque modélisation, dimensionnement et simulation » thèse de doctorat Université de Tlemcen 2004

[35] H.X.Yong, L, And U, J.Burnett, «Weather data and probability analysis of hybrid PV wind power generation systems in Hong Kong» Renewable energies 28(2003):1813-1824

[36] S. Diaf, D. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche « A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system » Energy Policy (2007) doi 10.1016/j.enpol.2007.06.020.

[37] J. Labbé, 'L'Hydrogène Electrolytique comme Moyen de Stockage d'Electricité pour Systèmes Photovoltaïques Isolés', Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2006.

[38] https://www.meteart.com/africa/algeria.

Annexe

Vitesse de vent de ville de Tamanrasset (km /h) [38]

Mois de janvier :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	jeudi	Vendredi
	24.8	26	27.5	22.8	17.3	18.3
18.3	14.8	19.5	18.5	14.8	17	12.8
13	15	12.7	16.8	17	26	20
15	17	24	25.3	24	31.3	27.8
24.8	21.5	19	22			

Mois de février :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	jeudi	Vendredi
				20.8	14.7	21.3
24.5	26.8	21.3	18	19.7	18	19.3
21.3	24.7	15	16	23.3	30	25
23.3	24.7	19.7	14	17	16.3	16
30	25.7	31.3	28.3			

Mois de mars :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	jeudi	Vendredi
				23	22.7	28.3
28	21	27.7	31.3	34.7	26	36.3
27.7	25	23.7	21.7	24	27.3	33.3
36.3	31.3	39	33.7	26.7	26.3	21.7
29.3	32.3	31.3	27	25.3	31	27.7

Mois d'Avril :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	jeudi	Vendredi
24	24.7	19	25	27	32	30.3
24	28.3	28	31.3	32	28.3	31
32.7	30.7	26	26	21.7	24	35.3
26	28	30.3	34	33	35	30
28	34					

Mois de Mai :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	jeudi	Vendredi
		27.7	24.7	25	25.3	26.7
30	28.7	17.7	30.7	22	27	25.7
30.7	31	32.3	29.7	27.7	27	33
25.7	31	31.7	32	35	28.3	25.7
23	29	25.7	32.3	26		

Mois de juin :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
					28.7	30.3
31.7	30	30.7	31	23	36	26.3
26	37.3	25.3	21	28	34	28.7
26	28.7	25.5	33.5	29 .7	21.3	25.3
29.3	27	20.3	29	28	32.7	32.7

Mois de juillet :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
32.7	31	37.7	31.3	31	31.7	39.3
39	33	31	34.7	31	33	33.3
26.7	24	33.7	27.3	30	24.7	22.3
23	26	27	23	26	27	35.7
29.7	22.3	22.3				

Mois d’aout :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
			29.3	33.3	23.7	21.3
24	26	28	31.7	28.7	30	36
30.3	32	27.3	35.3	33.3	30	23.7
31.7	34.7	29	25	21	29.7	31.7
31.7	19.5	35.7	30.7	36.7	36.7	

Mois septembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
						40.7
36.3	35	33.7	34.7	41.7	32.3	34.3
30	26.3	21.5	24.3	28.7	27	22.3
18.3	18.7	22.7	26	27.3	25.3	18.7
18	30	25.7	26.3	28.7	26	28.3
28						

Mois octobre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
	32	25.3	30.3	30.7	22.3	24.7
29	21	18.7	19	19	23.3	21.3
19.7	27.3	23.3	23.3	22	29	27.3
22.7	23	32.7	31	23.3	26	30.7
26	27.7	29	17.3			

Mois novembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
				21	22.3	19
18	18.3	19	19	20.3	22.3	14.3
17.3	19.3	18.3	19.3	23.7	20.7	16.3
17.3	18.7	19.3	18.3	18.3	20.3	22.3
18.7	21.3	16.7	12	17	18.3	

Mois décembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
						17.3
21.3	20.7	16.3	19	18	14.7	13.7
23.7	14.7	17	15.3	16.3	17	13.7
15	11.7	16.7	22.3	22	19.3	13.7
12.3	20.7	18.3	22.7	18.7	17.7	16.7
11.7	19					

Température de ville de Tamanrasset (°C) [36]

Mois de janvier :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
	19°	17.5°	18.3°	18.5°	19.3°	20.3°
21.7°	21.7°	22°	21.7°	21.3°	20.7°	21°
20.3°	20°	20°	19.3°	20.7°	20.7	22°
23°	24	23°	22°	23°	23°	22.3°
22.7°	18.8°	18.8°	18.5°			

Mois de février :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
				19.3°	19°	19.5°
18.5°	19.3°	20.3°	21.7°	1.7°	20°	21.8°
21.3°	20.7°	21°	20.3°	20°	20°	19.3°
20.7	20.7°	22°	23°	24°	23°	23°
23°	23°	22.3	22.7°			

Mois de mars :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
				23.3°	25°	24
24	24.7	25	25.3	25.3°	26.3°	25.7°
24.7°	23.7°	23.7°	24.7°	25.3°	25.7°	26°
26.7°	25°	25.3°	24.3°	23.3°	23.7°	24.3°
24.3°	25°	25.7°	26.7°	26°	25.3°	26.7

Mois d’Avril :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
26.3°	26.7°	28.3°	29°	30°	31°	29.7°
29	29	30	29.7	28.7°	29°	30.3°
28.7°	28.3°	28.3°	28.7°	28.7°	30°	30.3°
29.7°	28.7°	30.7°	29.7°	30.3°	30.3°	31
31.7	31°					

Mois de Mai :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
		31°	31°	32°	32°	32.7°
32.3°	32°	32°	32.3°	32°	33°	31°
32.3	32.7°	32°	32.3°	32°	33°	33°
32.3°	32.7°	32.3°	33°	32.3°	31.3°	33°
34	34°	33.7°	33.7°	33.3°		

Mois de juin :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
					33.7°	33.7°
34°	33.7°	33.3°	34°	33.7°	34.3°	35°
35°	35°	34.3°	34.3°	33.3°	34.7°	33.7°
33.3°	33.7°	32.5°	34°	34.7°	34.7°	34.7
34.7°	33.7°	35.3°	35°	35.3°	35°	34.3

Mois de juillet :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
35.3°	35.3°	35°	36°	36°	36.3°	35°
34.7°	33.7°	34°	34.7°	35.3°	34.3°	33.7°
34°	35.3°	34.7°	35°	33.7°	34.7°	34°
35°	36°	34.3°	34.3°	33.7°	34.3°	33°
33.7°	34.7°	35.7				

Mois d’aout :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
			35.3°	34.7°	35.7°	36°
35°	35.3°	35.3°	36°	34.7°	35.3°	34
33.3°	34.7°	34.7°	33.3°	33°	33°	33°
34.3°	32.3°	34.3°	34.7°	34.3°	34.3°	34°
33.7°	34°	33.7°	33.7°	33°	33.7°	

Mois septembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
						34.3°
33.7°	33.3°	33.7°	32.7°	33°	33.3°	32.7°
32.7°	33°	33.5°	33.3°	32°	32.7°	32.7°
33.3°	33.3°	33°	31.5	32.3°	32.7°	32.3°
32.7°	32°	32°	32.7	32.3	31.3°	31.7°
31.3°						

Mois octobre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
	30.7°	31.3°	29.3°	29.3°	29°	28.3°
28°	28.3°	28.7°	28°	28°	28.3°	28.3°
29°	27.7°	27.7°	28°	28.3°	27.7°	27.3°
27°	27°	27°	26.7°	27°	26.7°	25.7°
26.3°	26.3°	25.3°	26°			

Mois novembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
				23°	25°	25°
25.3°	26.3°	23°	25.3°	25°	22°	23.3°
24°	24°	23°	22.3°	21.3°	21°	21.7°
21°	20°	22.3°	21°	22.7°	22°	21°
21.7°	22°	23°	22.3°	21.7°	22°	

Mois décembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
						21.7°
20°	20°	21.7°	22°	21.7°	21.7°	21°
22.7°	21°	21.3°	22°	21°	21°	20°
19°	18.7°	18°	18.3°	17.3°	16.7°	17.3°
18°	18°	18.3°	18.3°	18.7°	19.3°	19
19.3°	18.7°					

Ensoleillement de ville de Tamanrasset (W/m^2) [36]

Mois de janvier :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
	4876	4885	4.890	4899	4910	4920
4925	4930	4945	4.960	4975	4986	4993
5000	5032	5090	5.099	5112	5119	5200
5209	5212	5220	5229	5233	5238	5240
5242	5242	5444	5246			

Mois de février :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
				5249	5252	5260
5269	5284	5290	5300	5330	5410	5430
5487	5565	5600	5660	5700	5750	5811
5964	5995	6026	6056	6087	6148	6178
6208	6240	6269	6299			

Mois de mars :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
				6328	6357	6390
6422	6478	6498	6533	6587	6590	6623
6650	6687	6711	6723	6751	6770	6795
6822	6838	6849	6863	6879	6892	6911
6945	6988	7005	7060	7092	7120	7134

Mois d'Avril :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
7167	7180	7199	7230	7245	7260	7281
7298	7310	7355	7383	7395	7422	7463
7477	7489	7501	7519	5527	7535	7546
7555	7567	7579	7594	7609	7624	7634
7648	7659					

Mois de Mai :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
		7681	7696	7709	7720	7734
7747	7758	7778	7789	7803	7819	7828
77840	7859	7879	7891	7905	7927	7941
7953	7965	7976	7987	7999	9023	8060
8088	8098	8115	8132	8145		

Mois de juin :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
					8159	8171
8188	8198	8209	8221	8237	8248	8260
8278	8298	8309	8327	8340	8356	8378
8391	8410	8425	8439	8458	8470	8485
8498	8510	8523	8537	8553	8563	8579

Mois de juillet :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
8588	8598	8615	8635	8650	8671	8687
8699	8702	8723	8740	8753	8767	8789
8801	8825	8839	8850	8884	8895	8923
8945	8967	8989	9050	9096	9123	9187
9202	9245	9279				

Mois d'aout :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
			9291	9310	9333	9356
9376	9388	9405	9429	9457	9490	9501
9530	9569	9593	9658	9623	9596	9558
9509	9487	9445	9419	9385	9353	9316
9299	9278	9249	9210	9133	9099	

Mois septembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
						8997
8950	8890	8850	8819	8788	8761	8723
8688	8654	8603	8589	8567	8519	8467
8438	8399	8338	8287	8223	8180	8111
8059	7987	7924	7880	7867	7828	7778
7745						

Mois octobre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
	7698	7667	7612	7588	7533	7489
7458	7382	7334	7280	7211	7187	7156
7098	7012	6998	6981	6945	6900	6876
6830	6801	6781	6757	6723	6680	6643
6621	6588	6561	6538			

Mois novembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
				6504	6487	6448
6401	6375	6343	6318	6300	6278	6258
6221	6198	6165	6112	6088	6034	5997
5976	5919	5901	5881	5855	5825	5801
5780	5756	5737	5714	5681	5643	

Mois décembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
						5621
5590	5575	5538	5512	5490	5473	5454
5431	5403	5382	5345	5321	5288	5259
5229	5201	5178	5111	5098	5023	4997
4951	4887	4845	4810	4789	4756	4734
4723	4701					

Profil de charge (watt .h) zawyia Ain Ghar Tamanrasset

Mois de janvier :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
	458030	458029	458031	458022	458017	458018
458019	458014	458019	458018	458014	458017	458012
458013	458015	458012	458016	458017	458026	458020
458015	458017	458024	458025	458024	458050	458047
458044	458041	458030	458037			

Mois de février :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
				458034	458020	458022
458026	458028	458023	458020	458019	458018	458019
458021	458030	458025	458026	458033	458040	458035
458030	458034	458020	458015	458020	458020	458020
458050	458045	458051	458050			

Mois de mars :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	jeudi	Vendredi
				458051	458050	458060
458060	458055	458059	458062	458065	458064	458070
458064	458060	458059	458058	458060	458062	458073
458079	458078	458084	458083	458075	458076	458071
458079	458082	458081	458077	458075	458081	458077

Mois d'Avril :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
413230	413376	413378	413379	413383	413381	413379
413379	413379	413380	413379	413379	413378	413380
413380	413379	413378	413378	413378	413382	413383
413382	413382	413382	413380	413383	413383	413385
413386	413387					

Mois de Mai :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
		413387	413387	413390	413390	413391
413395	413395	413395	413397	413395	413400	413399
413398	413399	413398	413398	413397	413400	413400
413396	413397	413398	413400	413399	413398	413450
413500	413502	413503	413503	413501		

Mois de juin :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
					468430	468430
468428	468426	468426	468428	468430	468440	468450
468450	468451	468446	468447	468445	468455	468445
468444	468446	468445	468450	468455	468455	468455
468459	468446	468469	468469	468470	468470	468471

Mois de juillet :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
468472	468472	468470	468480	468480	468483	468470
468466	468462	468470	468472	468476	468477	468475
468477	468478	468479	468479	468476	468475	468474
468478	468480	468479	468479	468475	468478	468475
468474	468476	468479				

Mois d’aout :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
			468479	468478	468478	468482
468480	468481	468481	468482	468479	468482	468478
468475	468476	468476	468475	468474	468474	468474
468476	468475	468474	468475	468475	468475	468476
468477	468477	468475	468476	468475	468476	

Mois septembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
						468478
468477	468475	468476	468475	468474	468475	468473
468474	468475	468476	468476	468475	468476	468476
468475	468475	468474	468473	468474	468474	468475
468475	468474	468474	468475	468476	468476	468477
468476						

Mois octobre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
	468474	468475	468474	468473	468472	468472
468471	468472	468473	468472	468472	468473	468473
468474	468475	468475	468475	468476	468477	468476
468476	468476	468476	468475	468476	468475	468474
468477	468476	468474	468475			

Mois novembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
				394030	394040	394035
394034	394030	394040	394040	394050	394060	394000
394060	394070	394075	394075	394085	394082	394065
394080	394070	394084	394080	394080	394100	394300
394101	394110	394120	394099	394200	394300	

Mois décembre :

Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	mercredi	Jeudi	Vendredi
						394300
394302	394299	394280	394280	394200	394100	394099
394100	394070	394090	394090	394100	394198	394180
394185	394095	394180	394200	394198	394198	394250
394240	394260	394250	394270	394280	394250	394230
394200	394290					